



Л.С. Табаксблат  
Л.И. Аткина  
А.М. Морозов

# **ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ**

**Ч. 2 (Специальная)**

**Электронное издание**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л.С. Табаксблат  
Л.И. Аткина  
А.М. Морозов

# **ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ**

**Часть 2  
(специальная)**

Учебное пособие

**Электронное издание**

Екатеринбург  
2015

УДК 911.5(075.8)  
ББК 26.82я73  
Т 12

Рецензенты:

Кафедра геодезии и кадастров Уральского горного университета;  
Доктор сельскохозяйственных наук ведущий научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН Кожевников А.П.

Т 12 **Табаксблат Л.С., Аткина Л.И., Морозов А.М.**  
**Ландшафтоведение:** учеб. пособие. Ч. 2 (Специальная). Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. 102 с. 680 Кб.  
ISBN 978-594984-517-2

Излагаются основные положения о геохимических процессах, протекающих в ландшафтах. Приведены сведения о распространенности химических элементов, миграции, их состоянии. Описаны географический и геохимический подходы к изучению и систематизации ландшафтов.

Пособие предназначено студентам негеографических направлений: ландшафтная архитектура, садоводство, природопользование, экологический туризм, природообустройство, земельный и городской кадастр и др., а также бакалаврам, магистрам и аспирантам.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 911.5(075.8)  
ББК 26.82я73

ISBN 978-594984-517-2

© ФГБОУ ВПО «Уральский государственный  
лесотехнический университет», 2015

© Табаксблат Л.С., Аткина Л.И.,  
Морозов А.М., 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
1. Распространенность химических элементов .....	8
2. Рассеянное состояние химических элементов .....	14
3. Миграция. Кларки. Кларки концентрации. Формы миграционного состояния элементов .....	18
3.1. Понятие миграции элементов. Кларки элементов .....	18
3.2. Факторы миграции химических элементов .....	23
Водная миграция элементов. Коэффициент водной миграции ...	25
4. Геохимические барьеры, условия концентрации элементов на геохимических барьерах .....	28
Элементарный ландшафт .....	35
5. Геохимическая основа систематизации ландшафтов .....	39
6. Токсичность неорганических веществ (обзор) .....	48
7. Химические элементы как загрязнители окружающей среды ....	54
Влияние загрязнения химическими элементами на состояние здоровья населения .....	57
8. Химические элементы в производственных, коммунально- бытовых отходах и средствах химизации сельского хозяйства ..	62
Изучение источников загрязнения окружающей среды (задачи, подходы методика) .....	80
Отбор, обработка, анализ проб .....	82
Вместо заключения: Живое вещество. Развитие В.И.Вернадского учения о биосфере .....	90
Контрольные вопросы .....	95
Библиографический список .....	97

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Процесс развития любой научной дисциплины время от времени сопровождается решающими изменениями в научном мышлении. Такие изменения были названы «парадигмами». В этом смысле и геохимия ландшафта вполне может быть охарактеризована как новая парадигма геохимии окружающей среды.

До последнего времени (имеется в виду время, отстоящее от нас всего на 3,5–4 десятилетия) развитие геохимии было связано с двумя основными парадигмами. Первая носила общий и целостный характер, рассматривала общие концепции и закономерности на основе теоретических исследований (главным образом), Становление геохимии как науки связано в первую очередь с именем В.И. Вернадского, определившего ее как науку об истории атомов в земной коре, процессах их миграции, рассеяния и концентрации. Им создано учение о биосфере как особой оболочке Земли, геохимия которой обязана деятельности живого вещества в течение геологического времени. В. И. Вернадским выдвинута идея о превращении биосферы в ноосферу в связи с появлением столь мощной силы, как геохимическая деятельность человечества.

Разработанная классификация геохимических процессов зоны гипергенеза, содержала среди них техногенез, т. е. процесс, обусловленный геохимической деятельностью человека.

В 30-е годы создано учение о геохимии коры выветривания — формах и стадиях ее развития и геохимических сопряжениях в рельефе. Осмысление процессов выветривания и почвообразования, исследование роли живого вещества в этих процессах привели Б.Б. Польшова (1953) к созданию в конце 40–х начале 50–х годов геохимии ландшафта — новой отрасли естествознания. Генетическое почвоведение и учение о ландшафтах В.В. Докучаева (1936), учение о биосфере и ее роли в геохимии живого вещества В.И. Вернадского (1965) — теоретические предшественники геохимии ландшафта.

Вторая парадигма общей геохимии возникла в 50–е годы. Здесь приоритет исследований переместился с создания общей теоретической базы на познание деталей, что привело к известному разделению геохимии. Прикладная геохимия в основном занималась выявлением и интерпретацией аномального распределения химических элементов, возникшего при выстраивании рудных тел. Она опиралась преимущественно на массовые оценочные и полуколичественные данные о среде. Возник определенный разрыв между общей (теоретической) и прикладной геохимией. Этот разрыв обострился в 60–70-х годах, когда не только ученые, но и широкая

общественность обратили внимание на проблему загрязнения окружающей среды. Как научная дисциплина, геохимия оказалась в известном смысле неготовой к этому, кроме достаточно узкой группы специалистов в СССР, разрабатывавшей, после основополагающих работ Б.Б. Полынова, основы новой науки — геохимии ландшафта (М.А. Глазовская, 1976), А.И. Перельман и др., 1975). Как раз это направление в геохимии оказалось более готовым к 70–80-м годам к восприятию и развитию идей целостности геохимии окружающей среды.

Таким образом, можно отметить, что «эволюция общей геохимии включала две основные парадигмы, разделенные во времени несколькими десятилетиями. Для первой парадигмы характерна общая тенденция к созданию целостного подхода к проблемам геохимии окружающей среды. Для первой отмечается тенденция к разделению науки на общую геохимию, прикладную геохимию и геохимию окружающей среды. Первые два направления разрабатывались специалистами по геохимии, третье - химиками, экологами и инженерами, интересы которых сосредоточились на проблемах загрязнения среды».

Эти тенденции имеют, разумеется, самый общий характер.

Геохимия ландшафта — неотъемлемая часть геохимии окружающей среды. Последняя, в свою очередь, - часть общей науки об окружающей среде.

Теоретический фундамент науки об окружающей среде применим и в геохимии ландшафта. Прежде всего, понятие целостности и принцип последовательных приближений. Первое выражается в том, что каждое химическое соединение среды связано со всякими другими соединениями. Конечно, это справедливо лишь до некоторой степени, но оно - основа развития научного подхода и решения конкретных задач. Например, благодаря целостному подходу можно рассмотреть соотношения локального и глобального, что реально влечет за собой необходимость стандартизации сбора данных.

Сущность второго принципа — в движении от общего к частному путем прохождения ряда стадий. Отдельные аспекты в этом случае являются иерархиями, состоящими из ряда ступеней, ведущими от общего к частному. Если рассматривать «иерархию пространства», то можно выделить глобальный, региональный и локальный уровни исследований. Для выявления возможностей методов химических анализов их эволюция проходит стадии оценки целесообразности и разработки. На начальных стадиях исследований можно получить интересные (и во многом достаточные) количественные данные, после стадии разработки тот же метод может предоставить более достоверные количественные результаты.

Говоря о геохимии ландшафта как о новой парадигме охраны окружающей среды, обозначим самые основные концепции ландшафтно-геохимического подхода в исследованиях:

- распространенность химических элементов;
- геохимическая классификация ландшафтов;
- миграция элементов в ландшафтах;
- геохимические потоки в ландшафтах;
- геохимические барьеры в ландшафтах;
- историческая геохимия ландшафтов.

Термин «ландшафты» охватывает участки с элювиальными (дренированные земли), супераквальными (болото или марш) и аквальными (река или озеро) условиями, а также переходные участки, совместно существующие на территории. Обычно при классификации ландшафтов по геохимическим признакам систематизирующей основой являются элювиальные ландшафты (кроме районов, где их нет или они распространены недостаточно, например, в области сфагновых болот Западной Сибири и др.). В этом и заключается целостность ландшафтно-геохимического подхода к геохимии окружающей среды. Она проявляется и при изучении всех химических элементов и соединений, наблюдаемых в среде в результате естественных и техногенных процессов глобального, регионального и локального масштабов. Рассматривая ландшафт с целостных позиций, можно анализировать модель миграции элементов в пространстве без тех ограничений, которые присущи обычно отдельным дисциплинам (почвоведению, экологии, лимнологии, гидрологии, гидрогеологии и др.). Когда целостный подход станет очевидным для всех специалистов по геохимии окружающей среды, геохимия ландшафта из описательной (пока еще) дисциплины превратился в науку прогнозную. Этим будет сделан, возможно, лишь первый, но наиболее важный шаг к использованию имитационных моделей для прогнозирования поведения любых количеств любых элементов (или их соединений) в любых ландшафтах.

Итак, геохимия ландшафта уходит своими корнями в общую науку об окружающей среде и в то же время — в геохимию (в том числе геохимию окружающей среды), геологию, химию, биологию, экологию и другие науки.

Ниже на рисунке показана схема взаимосвязей между геохимией ландшафта, геохимией окружающей среды и наукой об окружающей среде. Необходимо обратить внимание на толщину стрелок. Они пропорциональны значимости этих взаимосвязей. Эта диаграмма может использоваться при анализе специфических аспектов геохимии окружающей среды, лучше всего путем ранжирования указанных в ней составных элементов геохимии ландшафта.



Общие взаимосвязи между наукой об окружающей среде, геохимией окружающей среды и геохимией ландшафта

Любые научные дисциплины, развивающиеся по внутренним законам развития парадигм, проходят ряд последовательных стадий своего развития, которые подробно исследованы в общей теории систем. Не рассматривая сейчас подробно этот аспект, отметим, что парадигмы, находящиеся на начальных стадиях своей эволюции, неизбежно привлекательны для исследователей. Так было с геохимией в начале XX в., так было (несколько позже в 40-х–70-х) с гидрогеохимией, так ныне обстоит дело и с геохимией ландшафта. Этот этап — с конца XIX в. — пережило «докучаевское» почвоведение. Совершенно очевидно, что в геохимии ландшафта будут время от времени совершаться значительные открытия, которые, подобно идеям Б.Б. Полынова в 20-х–40-х годов распахнут перед этой наукой новые горизонты для размышления и исследований.



# 1. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Как уже известно из вышесказанного химические элементы весьма неравномерно распределены в земной коре, отдельных ее оболочках (базальтовой, гранитной, осадочной), а также в гидроландшафтной сфере. Различия между количеством в них разных химических элементов огромны. Так, количество самого распространенного элемента – кислорода – в сотни миллиардов раз больше количества радия. Восемь элементов составляют более 98,5% твердой земной коры.

Согласно данным американских ученых количество этих восьми элементов распределено следующим образом (мас. %): O 46,6; Si 27,72; Al 8,13; Fe 5,00; Ca 3,63; Na 2,83; K 2,59; Mg 2,09.

При этом в литосфере преобладают силикаты и алюмосиликаты. Объем, занимаемый различными элементами в литосфере, следующий (объемные %): O 91,77; K 2,14; Na 1,00; Ca 1,45; Si 0,80; Al 0,76; Fe 0,68; Mg 0,56.

Наиболее распространенные элементы находятся в литосфере в виде ионов приблизительно шаровой формы. Радиусы этих ионов были подсчитаны и был определен объем, занимаемый главнейшими ионами. Приведенные выше цифры (объем, %) носят приблизительный характер, но порядок величин абсолютно верен. Из этих цифр следует, что земная кора по объему в основном состоит из крупных ионов кислорода, которые в ней почти соприкасаются. Другие элементы занимают промежутки между атомами кислорода. Характерна редкость кремния, имеющего ион очень малого размера. Для гидросферы типично еще большее преобладание кислорода. Следовательно, литосфера в целом и ландшафт в частности в основном состоят из крупных ионов и атомов кислорода, занимающих большую часть пространства литосферы и гидросферы. Интересно также, что калий занимает по объему второе место в литосфере, а в гидросфере одно из последних.

Известны и многие другие попытки обосновать распределение химических элементов, основываясь на положениях Периодического закона Менделеева.

Наиболее близкое к нашему времени фундаментальное обобщение в этом же аспекте было сделано в 1962 г. академиком А.П. Виноградовым. С тех пор оно лишь незначительно дополнялось по отдельным элементам.

Таким образом, числа, выражающие частоту химических элементов в литосфере (кларки), проверялись неоднократно. В связи с этим сейчас

средний состав доступной для исследований части литосферы установлен, по крайней мере для главных элементов, достаточно точно (кларки), (табл.1.1).

Таблица 1.1

Содержание химических элементов (в %) в литосфере, осадочных породах, почвах и золе растений (кларки элементов)

Элемент	Литосфера	Осадочные породы	Почвы	Зола растений
1	2	3	4	5
H	0,15	—	—	—
Li	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Be	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
B	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
C	0,1	1,2	2,0	□
N	$1 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,1	□
O	47,2	51,84	49,0	□
F	0,026	0,05	0,02	$1 \cdot 10^{-3}$
Na	2,64	0,66	0,63	2
Ca	3,60	2,53	1,37	3
Mg	2,10	1,34	0,63	7
Mn	0,09	0,067	0,085	0075
Fe	5,10	3,33	3,8	1
Al	8,80	10,45	7,13	1,4
Si	27,6	24,8	33,0	15
P	0,08	0,77	0,08	7
S	0,05	0,03	0,085	5
Cl	0,045	0,016	$1 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$
K	2,60	2,28	1,36	3
Sc	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	—
Ti	0,6	0,45	0,46	0,1
V	0,015	0,013	$1 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$
Cr	0,02	0,016	0,02	0,025
Co	0,003	0,0023	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Ni	0,008	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Cu	0,01	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,02
Zn	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,09
Ga	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—
Ge	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	—	—
As	$5 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$5^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Se	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	—
Br	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,015
Rb	0,03	0,04	0,01	0,001
Sr	0,04	0,045	0,03	0,03
Zr	0,02	0,02	0,03	—
Nb	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	—	—
Mo	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 1.1

Элемент	Литосфера	Осадочные породы	Почвы	Зола растений
Pd	$1 \cdot 10^{-6}$	—	□	□
Ag	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$(\cdot 10^{-5})$	$1 \cdot 10^{-4}$
Cd	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$(5 \cdot 10^{-5})$	$1 \cdot 10^{-6}$
In	$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
Sn	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$(1 \cdot 10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3}$
Sb	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	—	—
Te	$1 \cdot 10^{-6}$	—	—	—
I	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Cs	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$(5 \cdot 10^{-4})$	$10^{-4}$
Ba	0,05	0,08	0,05	$10^{-2}$
La	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$(4 \cdot 10^{-3})$	—
Ce	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	—
Pr	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	—	—
Nd	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	—	—
Sm	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	—	—
Eu	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$(1 \cdot 10^{-4})$	—	—
Gd	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	—	—
Tb	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	—	—
Dy	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	—	—
Ho	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$(1 \cdot 10^{-4})$	—	—
Er	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	—	—
Tm	$8 \cdot 10^{-5}$	$(2 \cdot 10^{-5})$	—	—
Yb	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-4}$	—	—
Lu	$1 \cdot 10^{-4}$	$24 \cdot 10^{-5}$	—	—
Hf	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$(44 \cdot 10^{-4})$	—	—
Re	$1 \cdot 10^{-7}$	—	—	—
Os	$5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—
Ir	$1 \cdot 10^{-7}$	—	—	—
Pt	$5 \cdot 10^{-7}$	—	—	—
Au	$5 \cdot 10^{-7}$	—	—	$1 \cdot 10^{-4}$
Hg	$7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Tl	$3 \cdot 10^{-4}$	$(2 \cdot 10^{-4})$	—	—
Pb	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	—
Bi	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	—	—
Po	$2 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-14}$	—	—
Rn	$7 \cdot 10^{-16}$	$6,9 \cdot 10^{-16}$	—	—
Rh	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$
Ac	$6 \cdot 10^{-14}$	$6,8 \cdot 10^{-14}$	—	—
Th	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	—
Pa	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	—	—
U	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$

### Значение Периодического закона Менделеева в геохимии

В современном понимании химическим элементом считается вид атомов, обладающих одинаковым зарядом атомного ядра.

Важно знать, из каких элементов состоит Земля, в особенности земная кора, почвенный покров Земли, биосфера в целом, в том числе географическая оболочка (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Средний элементный состав организмов, %

Макроэлементы				
O 70	Ca $5 \cdot 10^{-1}$	Si $2 \cdot 10^{-1}$	S $5 \cdot 10^{-2}$	Fe $1 \cdot 10^{-2}$
C 18	K $3 \cdot 10^{-1}$	Mg $4 \cdot 10^{-2}$	Na $2 \cdot 10^{-2}$	
H 10,5	N $3 \cdot 10^{-1}$	P $7 \cdot 10^{-2}$	Cl $2 \cdot 10^{-2}$	
Микроэлементы				
Al $5 \cdot 10^{-3}$	B $1 \cdot 10^{-3}$	Zn $5 \cdot 10^{-4}$	Cr $n \cdot 10^{-4}$	Pb $5 \cdot 10^{-5}$
Ba $3 \cdot 10^{-3}$	Ti $8 \cdot 10^{-3}$	Rb $5 \cdot 10^{-3}$	Br $1,5 \cdot 10^{-4}$	Bn $5 \cdot 10^{-5}$
Sr $2 \cdot 10^{-3}$	F $5 \cdot 10^{-4}$	Cи $2 \cdot 10^{-4}$	Ge $10 \cdot 10^{-4}$	As $3 \cdot 10^{-5}$
Mn $1 \cdot 10^{-3}$		V $n \cdot 10^{-4}$	Ni $5 \cdot 10^{-5}$	Co $2 \cdot 10^{-5}$

В настоящее время уже известно более 115 химических элементов (в массовых изданиях Периодической системы указано пока 103 элемента). Не все они характеризуются определенной устойчивостью, некоторые, особенно открытые в самое последнее время, представлены лишь весьма коротко живущими изотопами.

Для изучения химических элементов требовалось обобщение, которое позволило бы установить закономерности их распределения. В XIX в. этими вопросами занимались многие исследователи в разных странах. Двести лет назад было известно лишь 20 элементов (в частности, водород был открыт в 1766 г.), но к середине XIX в. их число уже превысило 60. Было достаточно много попыток типизации элементов по их разнообразным свойствам. Близко подошел к вопросу об установлении связи между химическими элементами немецкий химик И.В. Дёберейнер (1829), выделивший идею триады. Например: Li — Na — K триада щелочных элементов, Ca — Sr — Ba триада щелочно-земельных элементов и т.д.

Фундаментальный принцип построения системы химических элементов был открыт в 1869 г. великим русским химиком Д.И. Менделеевым. Он предсказал и научно обосновал, что пустые места в таблице элементов будут заполнены (он, в частности, указал ряд не открытых к тому времени элементов и определил их точные места в таблице, вычислил атомные массы этих элементов и предсказал многие их свойства). В дальнейшем было сделано важное заключение о том, что химические элементы в Периодической системе располагаются в соответствии с их атомным номером, т. е. по числу зарядов атомного ядра. В.М. Гольдшмидт подошел к проблеме распределения элементов с допущением, что *первичное (начальное) распределение элементов происходило, вероятно, в период формирования перво-зданной Земли или вскоре после этого*. В самом начале истории Земли она

находилась в расплавленном состоянии и при её остывании выделились три фазы: металлическая, сульфидная и силикатная.

Концепция Гольдшмидта основана на данных о составе трех групп метеоритов: никелистое железо, троилит ( $\text{FeS}$ ) и силикаты. Он же предложил идею изучения распределения микроэлементов в этих метеоритных фазах, а также проведение анализа металлов, штейнов (сульфидов) и шлаков (силикатов), образующихся в металлургическом процессе. Гольдшмидт считал, что изучение состава силикатных пород и сульфидных руд на Земле даст ценные сведения о распределении элементов. Так выяснилось, что распределение элементов в метеоритах, продуктах плавки, естественных породах, сульфидных рудах согласуется достаточно хорошо. Из этого Гольдшмидт сделал заключение о том, что элементы можно классифицировать на основе геохимического сродства следующим образом:

- 1) сидерофильные – с сродством к железу; сконцентрированы преимущественно в ядре Земли;
- 2) халькофильные – с сродством к сере; сконцентрированы в сульфидах;
- 3) литофильные – с сродством к силикатам; сконцентрированы в земной коре;
- 4) атмосферные – в виде газов в атмосфере.

Выявилось, что некоторые элементы имеют характеристики, общие для двух групп. Например, золото в основном является сидерофильным элементом, но часто встречается вместе с сульфидами (проявляет халькофильность); хром в земной коре – ярко выраженный сидерофильный элемент, однако при недостатке  $\text{O}_2$  (например, в некоторых метеоритах) он может быть халькофильным и образовывать сульфидный минерал железа и хрома (добреелит,  $\text{FeCr}_2\text{S}_4$ ).

Эта группировка – приблизительный качественный признак природных ассоциаций и частично дает объяснение таким явлениям, как редкая встречаемость групп платины и золота в породах земной коры. Объяснение этому видится в том, что Pt и Au – сидерофильные элементы, и поэтому они сконцентрированы в ядре Земли (это косвенно подтверждается исследованиями лунного грунта). Очевидно, что геохимический характер элемента тесно связан с его положением в Периодической таблице, которое определяется электронной конфигурацией и другими периодическими свойствами элемента.

Термины «сидерофильный», «халькофильный», «литофильный» и «атмосферный» широко используются в геохимической литературе и имеют непреходящую ценность.

Геохимический характер элемента и его положение в Периодической таблице можно также увязать с типом связи, которую он предпочтительно проявляет в соединениях. Ионная, металлическая, ковалентная связи явно

присущи, по крайней мере, в общих чертах, соответственно литофильной, сидерофильной, халькофильной группам.

Литофильные элементы легко ионизируются (перенос электронов) и имеют тенденцию образовывать силикатные минералы с ионной связью (как в NaCl).

Халькофильные элементы образуют ковалентные связи (разделение электронов в соединениях с S, Se или Te).

Сидерофильные элементы обычно предпочитают металлическую связь, характерную для металлов, и не имеют тенденции к образованию соединений с O<sub>2</sub> или S; этим и объясняется то, что Au и Pt обычно встречаются в виде самородных элементов.

В. М. Гольдшмидт выявил также пятый тип химического сродства, который он назвал *биофильным*. Сюда он включил те элементы, которые обычно концентрируются в организмах, – это, главным образом, C, H, O, N, P, S, Cl и I, а также некоторые микроэлементы (V, Mn, Fe и B). Последнее дополнение представляется существенным в настоящее время, когда во всем мире широко развернулись исследования по охране окружающей среды, в рамках которых наиболее важны работы по общей и прикладной геохимии, геохимии ландшафта и биогеохимии. В создании последнего направления основополагающими были работы В.И. Вернадского.

## 2. РАССЕЯННОЕ СОСТОЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В окружающей нас природе одних химических элементов много, других – мало. Разница в содержании тех и других в природных объектах выражается часто миллионами (даже не сотнями и тысячами, а десятками миллионов раз). Например, в 1 т гранита Si более 320 кг, а такого элемента, как теллур, всего 1 мг.

Давно установлено, что атомы элементов, содержащихся в изобилии и в небольших количествах, ведут себя неодинаково: для первых характерно образование самостоятельных химических соединений (все крупные и мелкие тела планеты, вплоть до ее оболочек), вторые – рассеяны среди огромных масс химических соединений главных элементов.

Сильное рассеяние, раздробление вещества обусловило его более высокую реакционную способность, и для атомов в состоянии рассеяния характерна наибольшая геохимическая активность. В условиях биосферы рассеянные элементы чрезвычайно важны в процессе жизнедеятельности организмов.

Рост промышленности практически во всех странах вызвал небывалое ранее в истории Земли рассеяние химических элементов. Но еще до открытия состояния рассеяния ступенчатое, но поступательное познание состава окружающей природы дало исследователям огромные возможности для этого.

В XIX в. в основном было завершено создание теоретических основ химии. На этой основе были разработаны методы химического анализа. Они дали возможность определить состав образующих природу элементов, состав их соединений, записать их химической формулой. Постепенное обобщение накопленного огромного массива фактического материала позволило установить состав природных химических соединений (минералов), выяснить состав разных типов горных пород, природных вод и газов, атмосферного воздуха. При этом выяснилось, что земная кора, гидросфера и атмосфера (самая верхняя оболочка нашей планеты) на 99 % образованы всего 10–20 элементами. В настоящее время известно уже немногим более 115 элементов, но практически большинство из них встречается намного реже в виде самостоятельных природных образований.

**Атмосфера** в основном состоит из азота (75,51 %) и кислорода (23,15 %), в гораздо меньшем количестве в ней присутствуют аргон (1,28 %) и углекислый газ (0,046 %). В гидросфере преобладают кислород (85,8 %), водород (10,6 %), хлор (1,94 %) и натрий (1,04 %).

**Земная кора** сложена кислородом (47,0 %), кремнием (29,5 %), алюминием (8,05 %), железом (4,65 %), кальцием (2,96 %), калием (2,50 %), натрием (2,5 %) и магнием (1,87 %).

Разработка метода спектрального анализа знаменовала новую ступень познания природы. Пионером внедрения этих методов в исследования веществ земной коры и других оболочек нашей планеты был В.И. Вернадский. До работ организованной им лаборатории известные факты примесей в минералах трактовались лишь как механические, случайные загрязнения. Однако постепенно выяснилось, что многие элементы-примеси не могли быть выявлены из-за недостаточной чувствительности методов химического анализа.

Накапливающиеся факты говорили о том, что рассеянные элементы пронизывают твердые, жидкие и газообразные вещества. Вернадский считал, что по мере совершенствования методов анализов будут открыты все новые и новые элементы, находящиеся в каком-то особом состоянии и не объяснимые в качестве случайных примесей. Это особое состояние элементов ученый предложил называть **состоянием рассеяния**.

Чрезвычайно сложной оказалась в течение долгого времени проблема оценки распространенности химических элементов в земной коре. Начало этим исследованиям положил американский химик Ф.У. Кларк, в честь которого академик А.Е. Ферсман предложил называть **кларком** среднюю величину содержания элементов в земной коре, Земле в целом, или в иных природных телах. Специалисты часто характеризуют атомы как «кирпичики» Вселенной, в частности кларки (К) дают представление о распространении этих «кирпичей». Знание этих показателей переоценить трудно. Есть огромное количество примеров несовпадений кларков (кларковых содержаний) элементов и их распространенности с истинными концентрациями. Это примеры, основанные на анализе важных кларков элементов, часто не совпадающие с житейскими представлениями о распространенности тех или иных элементов (пример: Fe = Al; Cu = Ti; Ga = Hg и т. д.). Способность элемента к образованию самостоятельных природных химических соединений зависит от кларка, но полностью его величиной не определяется. Образование минералов связано с химическими свойствами элементов, их геохимической историей. Одни элементы в определенных условиях сильно концентрируются и как бы становятся главными на небольших участках, где и возникают их соединения.

Концентрация – процесс, противоположный рассеянию. Наиболее важное свойство элементов – их способность концентрироваться в земной коре. Вся современная индустрия основана и базируется на этих свойствах. Руда – природная концентрация химического элемента, которую выгодно экономически и технически (технологически) разрабатывать. На протяжении всей истории разработки непрерывно возрастают, так как основываются



на постоянном развитии многих фундаментальных и прикладных наук. Наряду с природными залежами металлов, в которых сосредоточены громадные концентрации, в технологические процессы добычи и обогащения ныне вовлекаются объекты со средними и даже малыми (бедными) содержаниями тех или иных металлов. Достижения наук дают возможность разработки новых технологических процессов для этого. Тем не менее, во всех случаях местонахождение – это очень большая концентрация металлов по сравнению с его кларком в земной коре.

Кристаллическое и рассеянное состояния – важнейшие формы нахождения атомов в земной коре. Преобладание формы зависит от величины кларка элемента. Восемь выше отмеченных элементов, содержащихся в земной коре более 1%, называются главными. Масса их настолько велика, что преобладающая часть их атомов упорядочена в кристаллическом веществе. Но за элементами, учитываемыми формулами, находятся еще миллиарды свободных атомов (В.И. Вернадский, 1965).

Все элементы, каждый из которых находится в земной коре 0,1 %, считаются малораспространенными. Одни из них способны концентрироваться в отдельных местах и в силу этого образуют многие самостоятельные минералы (это ныне можно уже отнести, в известной мере и к среде активного долговременного техногенеза). Другие более или менее равномерно рассеяны, редко или совсем не образуют самостоятельных минералов.

Не останавливаясь подробно на громадном количестве примеров, отметим снова новое заявление В.И. Вернадского: «Впечатление о ничтожности рассеяния в реальности исчезает; она заменяется обратным: впечатлением грандиозности».

Для рассеянных элементов характерно их широкое распространение: в воде, почве, живых организмах, они пронизывают всю биосферу (В.И. Вернадский, 1965).

Один из основных законов природы - стремление к равновесию между состоянием вещества и состоянием окружающей его среды. Минералы и породы, возникшие в недрах Земли при больших давлениях и температурах, не устойчивы на поверхности суши. Здесь происходит глубокое преобразование твердого вещества земной коры: освобождается большое количество элементов – около 20–25 % всех исходных горных пород. Эти элементы переходят из неподвижного состояния в кристаллических структурах в активное и начинают энергично мигрировать. Часть их с речным стоком покидает сушу и поступает в моря и океаны. На протяжении года на поверхности континентов выпадает 109 тыс. км<sup>3</sup> атмосферных осадков, а испаряется 72 тыс. км<sup>3</sup>. Остальные 37 тыс. км<sup>3</sup> стекают в моря и океаны. Рассеянные при выветривании горных пород металлы содержатся в поверхностных водах в количестве всего в 10<sup>-6</sup>–10<sup>-7</sup>.

Однако в результате круговорота воды в миграции участвуют огромные массы атомов (ежегодно в мировой океан выносятся 2,5 млрд т растворенных веществ).

Представление о приближенном характере величин выноса химических элементов речных стоков на протяжении одного года дает табл. 2.1).

*Таблица 2.1*

**Вынос химических элементов речных стоков**

Металл	Вынос в тыс. т	Металл	Вынос в тыс. т
Fe	24790	Ni	180
Al	1850	Zn	100
Zn	790	Co	30
Mn	370	Cu	40
Cu	190	Pb	40
Ti	190	V	30
		V	< 5

В таблице указаны только те массы элементов, которые удаляются за пределы суши. Значительно большие количества перемещаются на суше и, не достигая морских (океанских) акваторий, задерживаются в бессточных котловинах, озерах, болотах и т. д. (геохимических ловушках).

### **3. МИГРАЦИЯ. КЛАРКИ. КЛАРКИ КОНЦЕНТРАЦИИ. ФОРМЫ МИГРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ**

#### **3.1. Понятие миграции элементов. Кларки элементов**

*Миграция химических элементов – это комплекс процессов, вызывающих перемещение их в различных оболочках Земли с рассеянием на одних участках и концентрацией на других.*

При этом атомы элементов непрерывно движутся и проходят через различные фазовые состояния: магматический расплав, твердое тело, жидкость, газ и живое вещество.

Перемещение атомов связано со стремлением систем к энергетическому равновесию и направлено в сторону образования веществ с наименьшим запасом энергии.

Нормой распределения отдельного элемента в данной геосфере является кларк.

В ходе миграции совершается отклонение концентрации элемента от кларка («среднего» содержания) то в сторону рассеяния, то в сторону накопления.

Учение о миграции – одна из основных проблем геохимии. Проблема охватывает вопросы, связанные с исследованием законов миграции элементов: условий их разделения, концентрации и рассеяния.

В ландшафте преобладают те же элементы, что и в земной коре, для ландшафта также характерно резко неравномерное распространение химических элементов. Среди последних можно выделить две большие группы: элементы главные и элементы второстепенные.

К первой группе относятся O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, C, H, N, S, P, Cl. Все эти элементы имеют высокие кларки и составляют основную массу горных пород, почв, вод и организмов. Они определяют геохимические особенности ландшафта, условия миграции других элементов (например, кислотность и щелочность вод, окислительно-восстановительные условия и др.). Эти элементы – «геохимические диктаторы».

К второстепенным относится большая часть химических элементов Периодической системы. Они имеют низкие кларки, чем объясняется их

низкое содержание в ландшафте. Второстепенные элементы не определяют физико-химические условия среды, а следовательно, и условия миграции других элементов. В большинстве случаев их миграция зависит от той обстановки, которая создана главными элементами.

Так, например, натрий имеет высокий кларк в литосфере (2,64%), поэтому его много и в ландшафтах. В некоторых ландшафтах (например, в солончаках, соляных озерах) он определяет геохимическое своеобразие ландшафта, физико-химические условия среды. Элемент цезий в химическом отношении очень похож на натрий, но его кларк в литосфере очень мал ( $7 \cdot 10^{-4} \%$ ), в ландшафте его мало, и поэтому Cs не влияет на физико-химические условия среды и мигрирует в тех условиях, которые созданы главными элементами. Если бы кларк цезия был равен кларку натрия, то, понятно, что его роль в ландшафте была бы также велика, он был бы главным элементом.

Элементы, обладающие низкими кларками (приблизительно менее 0,01%), в геохимии называются *редкими*. Некоторые редкие элементы способны к концентрации в земной коре, образуя обогащенные породы и руды. Ландшафты, формирующиеся на таких породах и рудах, характеризуются также высоким содержанием данных элементов, которые в этих ландшафтах отнюдь не будут редкими и могут являться главными. Так, например, на участках мышьяковых, цинковых, свинцовых месторождений эти элементы могут являться главными элементами ландшафта (в то время как в большинстве ландшафтов они являются второстепенными и в геохимии относятся к числу редких). Но имеются и такие элементы, которые обладают и низкими кларками, и малой способностью к концентрации. Они рассеяны в земной коре, встречаясь в ничтожных количествах во всех породах, почвах, минералах. Такие элементы в геохимии называются *редкими рассеянными*, их роль в ландшафте всегда второстепенная. Таковы радий, йод, скандий, кадмий, индий, галлий, гафний, рений и другие.

Очевидно, что причины неодинаковой величины кларков элементов, не связаны с их химическими свойствами, так как близкие по химическим свойствам элементы характеризуются резко различной распространенностью, и, наоборот, многие весьма далекие в химическом отношении элементы распространены приблизительно одинаково. Так, например, в группе щелочных металлов кларки калия и натрия большие (2,60 и 2,64), а химически весьма близких к ним лития, рубидия и цезия маленькие ( $6,5 \cdot 10^{-3}$ , 0,03 и  $7 \cdot 10^{-3}$ ). Железа в литосфере много (5,10), а химически близких к нему кобальта и никеля мало (0,003 и 0,008), кремния очень много (27,5), германия мало ( $7 \cdot 10^{-4}$ ) и т. д. С другой стороны, содержание таких химически различных элементов, как кислород и кремний, характеризуется числами одного порядка (47,2 и 27,6), точно так же близки величины кларков

для фосфора и марганца (0,08 и 0,09), для металла кадмия ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) и типичного неметалла йода ( $3 \cdot 10^{-5}$ ) и т.д.

Таким образом, кларк элемента в земной коре не связан (или почти не связан) со строением электронной оболочки его атома, от которой в основном зависят химические свойства элементов. Поэтому внимание ученых обратилось к другой части атома – к атомному ядру.

В земной коре преобладают атомы наиболее легких элементов с наиболее простым строением атомного ядра, расположенные в начале Периодической системы. После железа (№ 26) нет ни одного элемента, содержание которого в земной коре превышало бы 0,1%. Элементы, расположенные в конце Периодической системы и имеющие наиболее сложные атомные ядра, состоящие из большого количества протонов и нейтронов, оказываются вообще неустойчивыми и разрушаются в ходе радиоактивных превращений. Таковы естественные радиоактивные элементы полоний (Po), радий (Ra), актиний (Ac), торий (Th), протактиний (Pa) и уран (U).

В последние годы были искусственно получены различные трансурановые элементы с порядковым номером, превышающим 92, которые отличаются еще более тяжелыми и сложно построенными неустойчивыми атомными ядрами (нептуний, плутоний, америций, кюрий и др.). Эти элементы не встречаются в земной коре (за исключением нептуния и плутония, следы, которых обнаружены в урановых минералах).

Но и среди легких также встречаются элементы с низкими кларками; так, например, относительно низко содержание в земной коре лития, бериллия и бора, занимающих третью, четвертую и пятую клетки Периодической системы.

Было также установлено, что элементы, имеющие четный порядковый номер, в целом преобладают над элементами с нечетными номерами. Так, для первых 28 элементов четные составляют по весу 86,36%, а нечетные 13,64%. Особенно большими оказались кларки элементов, порядковые номера которых имеют разность, равную или кратную 6 (O, Si, Ca, Fe, Sr, Sn, Ba).

Величины кларков некоторых элементов зависят не только от строения ядра. Например, особенно низкие кларки инертных газов гелия, неона, криптона и ксенона объясняются тем, что эти газы были потеряны первоначальной атмосферой Земли вследствие их неспособности образовывать химические соединения.

Все вышеизложенное о зависимости кларков химических элементов от строения ядра их атома имеет в виду именно среднее содержание элементов в земной коре. В ходе геологической истории происходили многообразные процессы перераспределения (миграции) химических элементов, приведшие к значительной концентрации некоторых из них в отдельных породах (например, углерода и кальция в известняках). Поэтому

химический состав литосферы на участке развития какого-либо конкретного ландшафта может значительно отличаться от среднего химического состава всей земной коры, особенно, если на этом участке развиты такие породы, как известняки, угли и пр.

При перемещении (миграции) может происходить изменение содержания данного элемента в породах или водах; в одних случаях происходит увеличение концентрации (обогащение), в других обеднение.

Принято говорить об участках с повышенным кларком, со средним нормальным и отрицательным (пониженным) кларком.

Кларк (по Ферсману – «новая константа мира») определяет все стороны поведения элементов. Энергично мигрирующие элементы с высокими кларками определяют геохимическую обстановку: Eh и pH, тип восстановительной среды и т.д. Подобные элементы А.И. Перельман назвал *типоморфными*. Как раз высокий кларк и энергичная миграция определяют типоморфность O, S, H, Fe и других элементов.

На сульфидных месторождениях типоморфны Cb, Zn, Pb, As и др. элементы руд. Рассеянные элементы или элементы с низкими кларками (Ra, Rh, Se) типоморфными не бывают.

Как указывалось, миграция – *это явления перемещения*, которые вызывают (или вызывали раньше) *отклонения* от того состояния, той обстановки и тех соотношений с другими элементами, которые были для них характерны в первичных формах накопления вещества. При этом кларк того или иного элемента соответствует норме его распределения в данной геосфере, и всякое отклонение от этой средней нормы в ту или иную сторону совершается путем миграции.

Если идет понижение содержания элемент «рассеивается», в другом случае происходит накопление (кларк повышается).

В целом все формы миграционного состояния элемента определяются следующим образом:

- ультрадисперсное состояние («микrokосмическое рассеяние»);
- дисперсное состояние (в изоморфных постройках);
- среднее содержание - кларк данной системы;
- накопление и относительная концентрация;
- концентрация с образованием месторождения (или техногенного накопления).

Для характеристики поведения отдельных элементов В.И. Вернадский (1965) предложил понятие о *кларке концентрации (КК)* как отношении содержания данного элемента в породах, в других образованиях земной коры к кларку литосферы (или кларку ее части кислых изверженных пород, основных, осадочных и т. д.).

Величина КК дает представление о степени концентрации элемента в данной геохимической системе. Чем меньше КК, тем больше генетических

типов концентрации. Например, КК Fe в рудах не более 10, поэтому есть много видов концентрации Fe: осадочные сидериты, латеритные, озерные руды, железные шляпы сульфидных месторождений, кварциты, Fe-Mn конкреции и др. То же относится к Al, Ca, Mg, Na, K, P и др. Но уже для Zn и Pb, КК которых в рудах *больше 1000*, возможность образования месторождений ограничена. В то же время природные тела, в которых КК для Zn и Pb приближаются к 10, не менее разнообразны, чем для Fe, Al.

Еще меньше возможностей для концентрации элементов при КК более 100 000 (для Hg, Sb).

Кларки и КК определяют содержание элементов в природных водах и ландшафтах и способ их осаждения. Так, высокие кларки Ca, Mg, Na, K и соответственно их высокие концентрации в водах создают возможность их осаждения в результате испарения вод.

Малые кларки Rb, Cs, Be определяют столь низкие концентрации их в водах, что для осаждения этих металлов так называемый механизм испарения не имеет большого значения. Поэтому известны эвапоритовые месторождения Na, Mg, Cu, Sr, а для Cs и Be их нет. То же в равной степени относится к ландшафтам.

Согласно А.И. Перельману, от кларка зависит и способность элемента к минералообразованию: чем меньше кларк элемента, тем меньше число его минералов. Прямой зависимости здесь нет, так как способность к минералообразованию определяется и химическими свойствами элементов, но все, же влияние кларков отчетливое. Действительно, чем ниже кларк элемента, тем меньше его содержится в природных системах земной коры, труднее достигаются произведения растворимости и выпадение самостоятельной твердой фазы из природных вод. Это справедливо также для газовых и расплавленных систем.

А.И. Перельман приводит интересный пример влияния кларка на минералообразование. Это влияние особенно четко выявляется при сравнении элементов одной химической группы. Так, в группе щелочноземельных металлов растворимость сульфатов уменьшается с ростом порядкового номера (наименее растворим  $RaSO_4$ ). В то же время известны минералы сульфаты Ca, Mg, Ba, но неизвестны минералы сульфаты Ra.

Причина – чрезвычайно низкий кларк Ra, определяющий его низкое содержание в природных водах ( $n \cdot 10^{-11}$  г/л) и исключаящий достижение произведения растворимости для  $RaSO_4$ . Следовательно, *число самостоятельных минералов является, с одной стороны, функцией химических свойств элементов, а с другой, кларка литосферы.*

## 3.2. Факторы миграции химических элементов

Геохимия верхних оболочек гидросферы, атмосферы, географической оболочки базируется на законах миграции, проходящей через ряд равновесных состояний; законы управляют химическими реакциями в водной среде и на границах вода – газовая оболочка Земли, вода – твердое тело, вода – живое вещество. Эти границы первостепенны и в ландшафтах.

Миграция элементов обусловлена большим числом факторов. Главным образом она зависит от строения атомов и их соединений. Важную роль играют параметры среды, в которой происходит миграция элемента.

Все факторы миграции можно разделить на две группы – внутренние и внешние. Это условное деление, так как обе группы факторов всегда действуют одновременно.

Главным, на чем основаны представления о роли *внутренних факторов* в процессах миграции, является вопрос о размерах атомов и ионов, участвующих в строении различных веществ.

**Химическая связь.** С точки зрения условий миграции, свойства химической связи проявляются в способности элементов (или их соединений) противостоять силам, направленным к разобщению их атомов, ионов или молекул. Разобщение происходит путем механического отрыва частиц друг от друга или сообщением им такого количества тепловой энергии, которое изменяет характер связи между частицами и переводит их в более подвижное состояние. Возможность разобщения частиц связана с энергией кристаллической решетки. Максимальной прочностью обладают соединения с высокими энергиями решетки. Универсальным фактором является теплота (ослабляет связи и, в конечном счете, приводит к изменению агрегатного состояния; твердое вещество переходит в жидкое, жидкое в газообразное).

**Свойства химических соединений.** В верхних геосферах, при господствующих там температурах и давлениях, большинство элементов находится в форме химических соединений. Поэтому свойства соединения являются определяющими в процессах миграции. Например, важной считается способность элементов вступать в соединения главным образом с кислородом, в меньшей мере с серой и другими элементами. При этом изменяются многие параметры, в том числе температура плавления, что определяет резко иные условия миграции многих элементов. Так, например, углерод плавится при температуре 3500°C и присутствует в верхних геосферах в твердом виде; температура плавления CO<sub>2</sub> отрицательная, поэтому в верхних геосферах это газ, обладающий высокой миграционной способностью.



**Энергетические свойства ионов.** Им принадлежит большая роль. Это означает, что в общем случае последовательность кристаллизации вещества из магм или же выпадения его из водных растворов направлена в сторону образования соединений со все более и более низкими энергиями решеток.

**Ионный радиус.** Важнейшим фактором, определяющим парагенетическую последовательность образования минералов, является размер (радиус) иона. Ион с большим радиусом предпочтительнее остается в жидкой фазе, а ион с малым радиусом — в твердой.

**Явление гравитации.** Оно связано с величиной массы атомов элементов и наличием гравитационного поля Земли. Играть большую роль в миграции. Особенно эта роль велика в распределении элементов с высокими кларками. Проявилась она в строении всей планеты преимущественно на ранних этапах ее развития. В результате действия этого фактора континенты в верхних частях сложены главным образом легкими породами, а в центре Земли, где предположительно сосредоточено железоникелистое вещество Fe и Ni — самыми тяжелыми из распространенных пород. Большая роль гравитационных свойств соединений элементов проявляется в процессах миграции веществ в поверхностных условиях (снос и перераспределение веществ при денудации, отложение их в водных бассейнах).

С гравитацией связаны скопления (месторождения) тяжелых, механически прочных веществ — касситерита, циркона, топаза, вольфрамита и др.).

**Радиоактивные свойства атомов.** В миграции они проявляются в непрерывном уменьшении количества радиоактивных элементов при распаде и образовании новых ядер с иными физико-химическими параметрами. Раньше это касалось лишь неустойчивости ядер тяжелых элементов. Но с введением в практику масс-спектрометрических методов исследования изотопов обнаруживаются новые (в том числе легкие) элементы, характеризующиеся радиоактивностью. Распад происходит медленно, в малых количествах. Но в течение геологического времени он приводит к существенному перераспределению ряда элементов в оболочках Земли. Радиоактивность имеет также исключительное значение и как внешний фактор миграции.

**Внешние факторы миграции** характеризуют среду, в которой перемещаются химические элементы, а среда — это магматические расплавы, твердые, жидкие (вода) и газообразные тела. Основные параметры водной среды — это концентрация раствора, pH, Eh, температура и давление.

Природные водные среды принадлежат к гомогенным или (чаще) гетерогенным системам. В гомогенных системах присутствует только одна фаза (жидкая, твердая или газообразная); гетерогенные системы состоят из нескольких фаз.

Важной характеристикой гомогенных систем водных растворов является их концентрация (количество вещества в единице объема).

Вещество в водном растворе, вступающее в реакцию в гомогенных системах, подчиняется закону действующих масс и управляется константами равновесия, т.е. отношением произведения концентраций продуктов реакции к произведению концентрации реагирующих веществ.

## **Водная миграция элементов. Коэффициент водной миграции**

В свое время академик Б.Б. Полынов предложил метод количественной оценки интенсивности миграции элементов в водах коры выветривания исходя из сопоставления состава речных вод с составом горных пород, дренируемых данной рекой и ее притоками. На этой основе он вывел ряды миграции элементов в коре выветривания, приемлемые для характеристик интенсивности миграции во всех ландшафтах.

Основываясь на идеях Б.Б. Полынова, для характеристики миграционной способности элементов был предложен коэффициент водной миграции  $K_x$ , равный отношению содержания данного элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в водовмещающих породах (или к кларку литосферы):

$$K_x = m_x 100 / a n_x,$$

где  $m_x$  – содержание элемента  $x$  в воде, г/л;

$n_x$  – содержание элемента  $x$  в породе, % (или, при отсутствии данных опробования пород, заменяют % величиной кларка элемента);

$a$  – сумма минеральных веществ воды, г/л.

Чем больше коэффициент водной миграции, тем интенсивнее мигрирует элемент.

Например,  $K_x$  для Са и Na в большинстве ландшафтов колеблется от 2 до 20, а для калия он в 10 раз ниже (0,2 – 2). Следовательно, кальций более энергичный мигрант в коре выветривания, чем калий;  $K_{xAl} < 0,1$  (плохой мигрант),  $K_{xU}$  и  $Mo > 1$  (хороший мигрант).

Интенсивность миграции одного и того же элемента неодинакова в разных частях зоны гипергенеза. Для каждой геохимической обстановки составлены ряды миграции элементов (табл. 3.1).

Для каждой конкретной геохимической обстановки (конкретного ландшафта, коры выветривания, почвы ит.д.) коэффициенты водной миграции элементов ( $K_x$ ,  $K_y$ ) относятся друг к другу, как интенсивности их миграции  $P_x$ ,  $P_y$ .

Таблица 3

Ряды миграции элементов в коре выветривания  
(впервые это сделал Б.Б. Полюнов)

Миграционные ряды	Элементы ряда	$K_x$
Очень подвижные элементы	Cl(Br,I),S	$n - 10 - n - 100$
Легкоподвижные элементы	Ca, Na, Mg, K	$n - n 10(n < 2)$
Подвижные элементы	SiO <sub>2</sub> (в силикатах), P, Мп	$n - n (n < 5)$
Слабоподвижные и инертные элементы	Te, Al, Ti	0, 10, $n$ и менее
Практически неподвижные элементы	SiO <sub>2</sub> (в кварце)	—

В гидрохимии есть понятие — показатель ионного стока. Он тоже характеризует интенсивность водной миграции элементов и представляет собой величину ионного стока в тоннах в год, рассчитанную на 1 км<sup>2</sup> бассейна реки.

Если разделить этот показатель на кларк элемента в литосфере, то получим приведенный показатель ионного стока  $I_x$  который для данного речного бассейна пропорционален коэффициенту водной миграции:

$$I_x / A_y = K_x / K_y.$$

Таким образом, величины приведенного показателя и коэффициента водной миграции — одного порядка.

**Принцип подвижных компонентов.** Из вышеизложенного ясно, что свойства природных сред (в том числе воды и др.) как сред миграции во многом определяются типоморфными элементами или ионами. Это чаще всего: O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и некоторые другие. Один и тот же элемент является типоморфным в одной обстановке (ландшафты и др.) и нетипоморфным в другой. Напомним, что типоморфны, как правило, элементы с высокими кларками. Например, Fe типоморфен в тундре и таежных болотах, но мало активен в степях. Содержание же Rb, Cs, Be, Вг настолько мало (например, в ландшафтах), что они никогда не бывают типоморфными. Но и среди распространенных не все элементы типоморфны. В большинстве случаев роль элемента в той или иной обстановке определяется не столько его содержанием, сколько интенсивностью его миграции и способностью к аккумуляции (накоплению). Часто из всех подвижных элементов типоморфны элементы, обладающие наибольшей миграционной способностью и накапливающиеся именно в данной обстановке. Например, в почвах солончаков Si намного больше, чем Na и Cl, но весь облик этих почв (и ландшафтов), все их особенности связаны с легкорастворимыми солями Na и Cl, а не Si и Al. Это

характерный пример интенсивно мигрирующих распространенных элементов.

Часто можно наблюдать, что из всех подвижных элементов типоморфны – элементы, обладающие наибольшей миграционной способностью. Они же и максимально накапливаются в той или иной обстановке, а остальные подвижные (!) элементы имеют как бы подчиненное значение.

Возьмем вновь пример с солончаками. В них кроме солей Na есть соли Ca (гипс или кальцит), но они в условиях солончаков не так важны, как более растворимые соли Na. Именно поэтому в солончаках типоморфны Na и Cl, но не Ca. Последний, наоборот, становится типоморфным элементом в горных степях (межгорные впадины), где большое влияние на ландшафт оказывают соли Ca, а солей Na очень мало. В таком ландшафте имеются подвижные элементы Si и Al, но они имеют подчиненное значение. Есть ландшафты, где эти два элемента, а также H<sup>+</sup>, наоборот, типоморфны, например влажные тропики и ландшафты, где Ca почти полностью удален.

Исследовав это явление, А.И. Перельман (1975) сформулировал **«принцип подвижных компонентов»**: «роль элемента определяется его содержанием в среде и интенсивностью его миграции. Распространенные элементы, наиболее интенсивно мигрирующие и накапливающиеся в ландшафте, являются типоморфными, в то время как значение других элементов, активно мигрирующих, но все же менее подвижных или не способных к аккумуляции в данных условиях, второстепенно».

## 4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ, УСЛОВИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРАХ

В практическом отношении важны те участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит *резкое уменьшение* интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация. Эти участки А.И. Перельман предложил (1961) называть *геохимическими барьерами*. В основу классификации барьеров положены виды миграции.

Выделяются два основных типа геохимических барьеров – природные и техногенные.

Природные барьеры делятся на три класса:

1) механические барьеры – участки резкого уменьшения интенсивности механической миграции;

2) физико-химические барьеры – это участки резкого уменьшения интенсивности физико-химической миграции; здесь различают окислительные, восстановительные, щелочные, кислые и др.

3) биогеохимические барьеры; они связаны с уменьшением интенсивности биогенной миграции (угольные залежи, торф, концентрация металлов в гумусовых горизонтах почв и т.д.).

*Техногенные* геохимические барьеры – результат техногенной миграции. Их изучение имеет важное значение в связи с проблемами охраны природы. Они также делятся на три класса – механические, физико-химические и биогеохимические.

Геохимические барьеры возникают в магме, гидротермальных растворах, почвах, коре выветривания, реках, морях, подземных водах и других системах, поэтому геологические условия формирования геохимических барьеров разнообразны, но их геохимическая сущность в самых разных частях земной коры нередко одинакова.

Так, восстановительный сероводородный барьер известен в морской воде (Черное море), в водах океанов, соляных озер, в солончаковых почвах, в подземных водах на участках разрушения месторождений, в зоне цементации сульфидных руд и т. д.

*Размеры барьеров* различны. А. И. Перельман упоминает о макро-, мезо-, микробарьерах (аналогично макро-, мезо- и микрорельефу, климату и т. д.). Следовательно, главное значение имеют не абсолютные, а относительные размеры барьеров.

Барьеры – это граница, переходная область, где одна устойчивая обстановка на сравнительно коротком расстоянии сменяется другой. Например, зона встречи пресных речных вод с морскими в устьях рек представляет собой геохимический барьер шириной в сотни и тысячи метров, но по сравнению с пространством океана и длиной рек – это ничтожная величина. В почвах мощность отдельных горизонтов (А, В, С, Д) – десятки сантиметров, граница между ними (геохимический барьер) – миллиметры и/или сантиметры.

Понятие «барьер», согласно А. И. Перельману, – это представление не об определенной устойчивой геохимической обстановке или процессе, а об ее изменении. *Барьер – это место, где один процесс (обстановка) резко сменяется другим.*

На участке геохимического барьера на коротком расстоянии происходит резкая смена условий миграции элементов. Такой перепад миграционной способности приводит к значительной концентрации элементов. Барьеры, возникшие на небольших территориях, в плане имеют овальную, линзовидную или линейную форму и создаются в результате резкого изменения физико-химических или иных условий среды. Для образования барьеров благоприятны чередование пластов разной проницаемости, а также наличие литологических и тектонических контактов (например, сланцев и известняков), длительность медленных перемещений «фронта» вод. Рудные тела приурочены обычно к водонепроницаемым породам (конгломераты, пески, песчаники, известняки трещиноватые и закарстованные и т.п.) Эти же породы могли быть водопроницаемыми и в геологическом прошлом.

В основу систематики барьеров могут быть положены факторы, приводящие к концентрации элементов.

Это положение полностью можно отнести и к условиям накопления загрязняющих веществ на техногенных барьерах.

Рассматривая условия концентрации элементов на геохимическом барьере, Перельман в свое время предложил формулу:

$$P_x = K m_i / (a_1 - a_2),$$

где  $P_x$  – содержание элемента  $x$  в руде, на барьере, в ореоле загрязнения и т. д.;

$K$  – коэффициент, зависящий от содержания «инертной» массы цемента; он всегда  $< 100$ , обычно 20-50;

$m_i$  – содержание элемента  $x$  в водах, поступающих к барьеру, г/л;

$a_1$  – минерализация воды, поступающей к барьеру, г/м;

$a_2$  – сумма минеральных веществ, г/л, не осадившихся на барьере;

$(a_1 - a_2)$  – количество минеральных веществ, которое осадилось на барьере.

### *Основные типы концентрации элементов на барьерах*

Как указывалось выше, геохимические барьеры могут иметь преимущественно механический, физико-химический или биогеохимический характер. Однако чаще всего природный барьер сочетает в себе черты всех трех типов. С механическими барьерами связано, например, образование речных россыпей, в процессе формирования которых тяжелые минералы механически осаждаются из воды. Физико-химические барьеры возникают при резких изменениях величины рН или соотношения рН/Eh. Примером биогеохимического барьера может быть гумусовый слой лесной почвы - он играет роль горизонтального барьера для ряда микроэлементов (обогащение гумуса Be, Co, Ni, Zn, Ga, Au, Cd, Sn, Pb, Ti, Ag, As), которые на нем аккумулируются. Эти элементы поглощаются корнями деревьев из почвы, а затем возвращаются в нее с опадом. Не все элементы задерживаются в гумусовом слое, некоторые мигрируют сквозь него в минеральные горизонты почвы. Из этого ясно, что действие биогеохимических барьеров носит избирательный характер.

Что касается механических барьеров, то на протяжении одного и того же барьера может концентрироваться разный материал. Это часто связано с тем, что по профилю почвы уменьшается поступление илистого материала (крупного и тонкого) и возрастает доля глинистых частиц. Механические барьеры образуются там, где резко изменяется скорость водного и воздушного ландшафтно-геохимических потоков (ЛГП). Это может быть, в частности, в ледниковых районах, когда движение льда нарушает сложившуюся миграцию минералов и перемещение пород или воды. Механические барьеры часто формируются и ниже дневной поверхности в водоносных горизонтах при изменении структуры и проницаемости горных пород.

Границы между разными геохимическими обстановками миграции элементов лежат в основе учения о геохимических барьерах. Из приведенного выше определения этого явления следует, что наиболее информативны участки смены физико-химических обстановок биокосных систем, иначе физико-химические барьеры. Согласно А. И. Перельману, впервые разработавшему концептуальные модели геохимических барьеров и давшему их систематику, концентрация элементов на физико-химических барьерах зависит, с одной стороны, от класса барьера, с другой, от состава вод, поступающих к барьеру. Все физико-химические барьеры разделены А.И. Перельманом на ряд классов:

- 1) окислительные (в их числе кислородный барьер);
- 2) восстановительные (сероводородный и глеевый);
- 3) сульфатный и карбонатный;
- 4) щелочной;
- 5) кислый;
- 6) испарительный;
- 7) адсорбционный.

Дадим краткую характеристику *типов концентрации химических элементов* на некоторых классах физико-химических барьеров.

*Окислительный кислородный барьер* возникает в местах резкой смены восстановительных условий окислительными. В частности, на дне озер и иных водоемов происходит просачивание вод, несущих следы восстановительной обстановки с повышенным содержанием Fe и Mn, которые осаждаются при смешении кислородных и глеевых (восстановленных) вод. Это наиболее очевидное проявление кислородного барьера. Однако он может проявляться и не столь очевидно. Имеются примеры (достаточно редкие), когда кислородные воды проникают на большие глубины, свыше 1 км. Такие условия сформировались, в частности, в предгорной части Приташкентского артезианского бассейна.

К действию кислородного барьера относятся, кроме выпадения гидроксидов Fe и Mn, и такие явления, как цементация прибрежных песков и галечников. На кислородном барьере с изменением положения кислородной границы при колебательных движениях земной коры происходила периодическая смена окислительных условий восстановительными и наоборот. В окислительной обстановке широко развивалась деятельность тионовых бактерий. В такой обстановке миграции кислородной границы формировались месторождения самородной серы. Таковы, в частности, серные месторождения Карпат и Средней Азии. Кроме Fe и Mn, одним из контрастно осаждающихся на этом барьере элементов является также кобальт (Co).

*Восстановительный сероводородный барьер* характеризуется тем, что воды с окислительными или слабовосстановительными условиями встречаются на своем пути сероводород (довольно часто это ареалы  $H_2S$  на участках ранее существовавших, но разрушенных, окисленных углеводородных скоплений — нефти, битумов). Если воды окислительной обстановки обогащены металлами, то при соприкосновении вод разных обстановок происходит выпадение металлов в форме нерастворимых сульфидов. На этом барьере концентрируются элементы V, Fe, Co, Ni, Си, Zn, As, Cd, Hg, Pb, U. Такому барьеру мы обязаны образованием целого класса медных, полиметаллических, урановых, редкометалльных месторождений.

В этих случаях создаются благоприятные условия для осаждения рудных элементов из водных растворов и осадочного рудонакопления. Одной из разновидностей такого барьера являются также контакты вода-нефть и вода-битум на соответствующих месторождениях. Конфигурация этих контактов и сами контакты (границы между указанными средами) могут меняться (мигрировать) в ходе геологической истории, т. е. при образовании месторождений, а также в техногенезе, при разработке месторождений, особенно если она ведется с использованием технологий поддержания пластового давления. В этом случае в нефтяной пласт закачиваются «чуждые», как правило, кислородные воды (речные и др.), входящие в сопри-



косновение с пластовыми, принадлежащими восстановительной обстановке водами.

*Щелочной барьер* возникает на участках резкой смены кислых вод нейтральными и/или слабощелочными, чаще всего на контактах известняков с другими породами. На этом барьере концентрируются Ca, Mg, S, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd. Известно, что в зоне окисления сульфидных рудных месторождений образуются кислые и сильно кислые воды (рН 1–2...4–5,5). Такие же кислые воды образуются в среде так называемых рудничных (в водоприемном пространстве рудников, разрабатывающих сульфидные руды) и шахтных вод (в угольных шахтах, особенно разрабатывающих сильносульфидизированные угольные залежи). Эти воды дренируют сульфидные и сульфидизированные залежи. Если возникает контакт этих вод с известняками, то их рН резко повышается, металлы выпадают из растворов в виде вторичных минералов в карстовых полостях или же они замещают известняки.

Один из примеров результата такого процесса — никелевые месторождения так называемого уфалейского типа на Среднем Урале. На медных и других сульфидных рудниках явление щелочного барьера давно практически используется на станциях нейтрализации. На этих сооружениях происходит нейтрализация поступающих из шахт или карьеров кислых рудничных растворов путем их искусственного контакта с заранее подготовленной известью ( $\text{CaCO}_3$ ). При этом рН возрастает до 10–12, и токсичные тяжелые металлы и неметаллы (Cu, Zn, Ni, Pb, As, Mo, Cd и др.) осаждаются, происходит очистка растворов, они становятся менее токсичными для окружающей среды. Такие станции нейтрализации – пример техногенного щелочного геохимического барьера, созданного искусственно.

*Испарительный барьер* создается на участках (или чаще всего на значительных пространствах) аридной зоны Земли в результате сильного испарения. Возможность активного функционирования этого барьера существовала, несомненно, и в геологическом прошлом. Следствием деятельности испарительного барьера являются многочисленные соляные залежи как морского, так и континентального галогенеза, разнообразные осадки соляных озер, засоленные почвы аридных и полуаридных областей нашей планеты и др.

На участках, где реализуется «барьерная функция» этого класса, накапливаются и концентрируются прежде всего элементы с высокими кларками, являющиеся типоморфными для подобной геохимической обстановки и таких ландшафтов. Это, прежде всего Cl, Na, K, N, Mg, Ca, S, Br, F, а также Sr, Rb, Li, Zn, V, Mo, U. Для малокларковых и ультрамалокларковых элементов в этих условиях не достигаются соответствующие величины произведений растворимости.

В биосфере засоление развивается уже более 500 млн лет, т.е. на протяжении всего фанерозоя, а в геологической истории Земли отмечен ряд эпох наиболее мощного соленакопления, например, в девонском и особенно пермском периодах. Наследием этих эпох являются наиболее крупные залежи ископаемых солей (Верхнекамский бассейн в Приуралье, Бахмутская котловина в Донбассе и др.). А.Е. Ферсман предложил именовать галогенезом процессы миграции и концентрации солей. Среди множества особенностей проявления галогенеза особенно глубокого изучения потребовали солончаки и солонцы, начало этим исследованиям положили работы К.К. Гедройца. Сейчас это крупный самостоятельный раздел почвоведения, в развитие которого внес выдающийся вклад известный почвовед и геохимик В.А. Ковда.

*Адсорбционные барьеры* возникают в местах, «где воды соприкасаются с сорбентами – веществами, способными поглощать (сорбировать) из растворов растворенные газы, ионы и молекулы» (Перельман, 1977).

Эти барьеры очень характерны для контактов глин, торфа и других адсорбирующих пород с водами, для почв, глинистых илов океанов, морей, водоносных горизонтов на их контакте с водоупорными породами торфяных болот. В курсе почвоведения рассмотрены поглощательные способности почв, механизм поглощения вещества при адсорбции. В результате сорбционных процессов химические элементы извлекаются из «недонасыщенных вод», из которых самостоятельные минералы таких элементов образоваться не могут. Более того, есть элементы, для которых сорбция почти единственный механизм концентрации в пределах биосферы. Это прежде всего ряд редких элементов, собственные минералы которых в биосфере не образуются, например, соседи Na и K по Периодической системе, так называемые редкие щелочи Rb и Cs. Глины поглощают рубидий из вод, и в результате, хотя и в весьма малых количествах, за геологическое время на глинах концентрируется этот металл. Сорбция глинами характерна и для цезия.

Отмечены случаи, когда на одних и тех же участках формируются разные барьеры, в частности адсорбционный и кислородный. На одном из кислородных барьеров Бурятии из глеевых вод осаждались гидроксиды железа (Перельман, 1977). Но они хорошие сорбенты для мышьяка и ванадия (As, V) и др. элементов. Поэтому здесь же образовался и сорбционный барьер, т. е. на таких участках мы обычно видим формирование совмещенных геохимических барьеров, в данном случае кислородно-сорбционного.

Известно, что на окисляющихся сульфидных рудах формируются сернокислые воды. На них образуются сорбционные барьеры (аномалии) с концентрациями Si, Zn, Ag, Cd и других металлов. На таких участках в глинах иногда накапливается до 1 % Cu (по нынешним кондициям это уже медные руды), однако медные минералы не обнаруживаются.

То обстоятельство, что в условиях этого барьера сорбируются преимущественно металлы (но не только!), объясняется тем, что адсорбирующая тонкодисперсная среда – глинистые частицы – несет на своей поверхности отрицательный электрический заряд, что и обуславливает сорбцию положительно заряженных катионов из растворов. Таким образом, адсорбционный барьер является аккумулятором достаточно большой гаммы химических элементов: Ca, Mg, P, S, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Mo, Hg, Ru, U, Ra.

Интересным бывает наблюдаемое в природе сочетание физико-химических и биологических процессов (частью это *биогеохимические барьеры*). Известно, что сероводород образуется за счет микробиологического восстановления сульфатов ( $\text{Cорг} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{C O}_3^2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} + Q$  ккал). В ходе дальнейшей миграции  $\text{H}_2\text{S}$  в приповерхностных условиях происходит его окисление под действием других видов бактерий; так образуются отложения самородной серы:  $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$ .

В целом биогеохимические барьеры могут возникать на локальном, региональном и даже глобальном уровнях. В сущности, вся биосфера может рассматриваться как биогеохимический барьер, по крайней мере, для некоторых элементов, например для углерода.

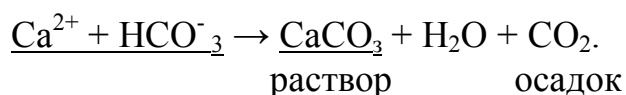
Этот барьер усложняется под действием живого вещества, которое, осуществляя процессы дыхания и фотосинтеза, дает начало миграции углерода в атмосферу и обратно, а также из-за более медленного круговорота углерода в живом и косном (мертвом) веществе.

Аккумуляция органики за геологическое время, приводящая к накоплению в недрах нефти, газа и угля, – это также пример влияния на круговорот углерода геохимических барьеров. Пример биогеохимического барьера на земной поверхности – образование верхового торфяника в условиях влажного климата. В этом случае в результате совпадения уровня грунтовых вод с земной поверхностью, а также в связи со свойствами торфяной массы кислородный барьер образуется под слоем растущих мхов. Последний препятствует поступлению кислородных грунтовых вод, благодаря чему сохраняется кислая реакция и низкое содержание кислорода. Это предохраняет подстилающие слои органического вещества от окисления и разложения. Толщина торфяного слоя при таких условиях среды может достигать 5 м и более.

*Термодинамические барьеры* возникают в местах резкого изменения температур и/или давлений. В частности, в местах выхода на поверхность углекислых вод при снижении давлений наблюдаются выделение  $\text{CO}_2$  и выпадение твердого осадка, в котором часто обнаруживаются и другие компоненты (Pb, Zn и др.). Широко известны отложения арагонита в курортных районах Чехии (Карловы Вары), травертина – на Кавказе («Горячая гора» в Пятигорске). Такие же явления понижения давления в водах,

богатых  $\text{CO}_2$  и ионами  $\text{HCO}_3^-$ , наиболее изучены на месторождениях углекислых лечебных вод.

Углекислые подземные воды часто имеют высокую температуру, в них растворимы многие металлы, образующие (только в растворах) бикарбонатные соединения типа  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Pb}(\text{HCO}_3)_2$  и т.д. (точнее, в воде имеются ионы металлов и  $\text{HCO}_3^-$ , т.е.  $\text{Me}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ ). При выходе таких вод на поверхность давление  $\text{CO}_2$  понижается, бикарбонаты переходят в труднорастворимые карбонаты, и в результате на таком термодинамическом барьере карбонаты осаждаются:



Подземные воды в известняках особенно насыщены  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , в местах выхода таких вод на поверхность отлагаются известковые туфы (травертины). Таковы районы «Горячей горы» в Пятигорске, Силурийское плато под Санкт-Петербургом и др.

Кратко упомянем *техногенные геохимические барьеры*, возникающие в результате хозяйственной деятельности людей. Мы упоминали о функции таких барьеров и выше, при описании щелочного барьера. По механизму возникновения техногенные барьеры не отличаются от природных. Сейчас ясно, что металлургические, химические и горнорудные предприятия, тепловые электростанции имеют токсичные отходы, задерживаемые на техногенных барьерах. Перечень элементов, которые накапливаются на них, весьма широк, так как техногенез чрезвычайно усиливает миграцию многих элементов, в том числе и редко выявляемых в биосфере вне техногенеза. Поэтому изучение техногенных барьеров – неотъемлемая часть исследований окружающей среды.

## Элементарный ландшафт

Термин «**Элементарный ландшафт**» от лат. *elementum* – первичная материя, первоначально предложен Б. Б. Полыновым (1915). Это участок, сложенный однородными породами, находящийся на одном элементе рельефа, в равных условиях залегания грунтовых вод, характеризующийся одинаковым характером растительных ассоциаций и одним типом почв (по Полынову и Глазовской). «Участок, на протяжении которого сохраняется не только тип, но и разность почв или повторение таких сочетаний почв, которые обуславливаются сочетаниями определенных предельных элементов ландшафта» (Полынов, 1953) (рис. 4.1).

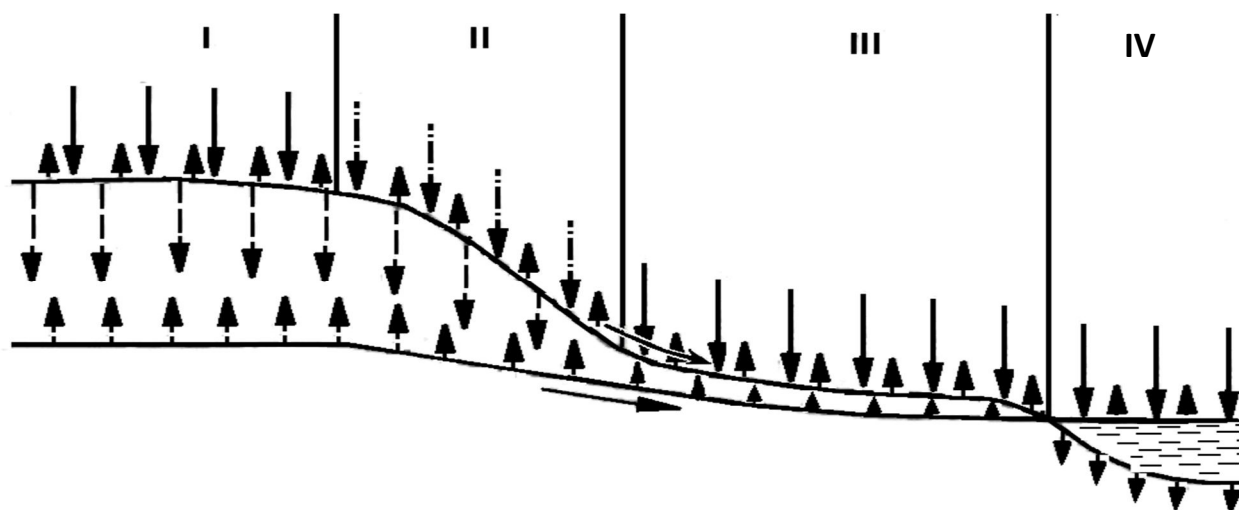


Рис. 4.1. Схема элементарных ландшафтов:

I – элювиальный; II – трансэлювиальный; III – супераквальный (гидроморфный);  
IV – аквальный (Глазовская и др., 1961)

Изучение природных зон и конкретных ландшафтов привело географов к представлению о единицах, из которых построены все природные ландшафты, о своего рода «атомах ландшафтов». Это представление возникло почти одновременно у различных ученых, причем разные единицы получили различные наименования: «элементарный ландшафт» Б.Б. Польшова (1915), «фация» Л.С. Берга (1945), «биогеоценоз» В.Н. Сукачева (1948). Б.Б. Польшов (1953) отмечает, что «элементарный ландшафт в своем типичном проявлении должен представлять один определенный элемент рельефа, сложенный одной породой или наносом и покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом. Все эти условия создают определенную разность почвы и свидетельствуют об одинаковом на протяжении элементарного ландшафта взаимодействии между горными породами и организмами».

Особенность этого ландшафта в том, что в нем нет каких-либо *внутренних причин*, ограничивающих его размеры, т.е. понятие «элементарный ландшафт» не связано с максимальными размерами, его можно представить в широком интервале размеров. Отсюда следует предложенный в 1951 г. А.И. Перельманом критерий выделения элементарных ландшафтов: «при отнесении какого-либо участка земной поверхности к элементарному ландшафту необходимо учитывать возможность (хотя бы мысленную) распространения данного элементарного ландшафта на значительно большей территории». А.И. Перельман приводит ряд примеров, иллюстрирующих это положение (1961): пятно солончака размером 10 м<sup>2</sup> является элементарным ландшафтом, так как мы можем себе представить солончаки

размером в десятки и сотни раз большие; элементарными ландшафтами по тому же критерию являются такыр, лесной массив определенного типа, черноземная равнина с определенной растительной ассоциацией и разнообразием почвы и т. д.

В то же время кочка на болоте, муравьиная куча, одинокое дерево, норы землероя и другие подобные образования нельзя считать элементарными ландшафтами. Б. Б. Побынов предложил называть их предельными структурными элементами ландшафта, или деталями ландшафта. Они входят в состав элементарного ландшафта. Чем сложнее элементарный ландшафт, чем интенсивнее в нем миграция химических элементов, чем больше видовое разнообразие, тем больше и площадь выявления ландшафтов. Наименьшие площади выявления – в пустынях, т. е. в ландшафтах без высшей растительности (такыры, шоровые солончаки), наибольшие – в лесных ландшафтах влажных тропиков с их огромным видовым разнообразием.

К морфологическим признакам относится *мощность элементарного ландшафта* – расстояние от его верхней границы до нижней. Верхняя граница находится в тропосфере и определяется зоной распространения пыли земного происхождения, обитания птиц и насекомых. Нижняя граница – первый от поверхности водоносный горизонт (включительно). Мощность элементарного ландшафта может испытывать значительные колебания.

Миграция химических элементов обуславливает неоднородность элементарного ландшафта по вертикали; он расчленяется на несколько *природных тел*: надземную часть, почву, кору выветривания, водоносный горизонт. Не все эти тела имеются в каждом элементарном ландшафте, местами отсутствует водоносный горизонт (т. е. он за пределами ландшафта, например, в некоторых пустынях), или он совмещен с почвой (поймы, иногда болота).

Природные тела отличаются и химическим составом. Вертикальная дифференциация характерна и для отдельных тел; горизонты одной и той же почвы имеют различный состав и разные физико-химические условия. Кислая реакция может преобладать в верхних горизонтах, щелочная – в нижних, в верхних горизонтах среда окислительная, в нижних – восстановительная. Резкая дифференциация вещества и физико-химических условий по вертикали характерная особенность элементарных ландшафтов.

Термин «элементарный ландшафт» используется в работах, связанных с исследованием *геохимии ландшафтов*. Выделяют три главных типа элементарных ландшафтов: элювиальные, субаквальные и супераквальные.

**Элювиальные ландшафты** формируются на возвышенных элементах рельефа. Поступление вещества и энергии происходит из атмосферы. Преобладают процессы выноса элементов как с потоками вод в растворенном виде, так и в результате перемещения вниз твердого вещества.

**Субаквальные ландшафты** формируются в отрицательных формах рельефа. В них преобладают процессы накопления вещества, поступающего из элювиальных и супераквальных ландшафтов.

**Супераквальные ландшафты** занимают промежуточное положение между двумя вышеназванными. Происходит как поступление веществ (извне и из элювиальных ландшафтов), так и вынос его в субаквальные ландшафты.

**Геохимический ландшафт** – ландшафт геохимический – совокупность *элементарных ландшафтов*, от элювиальных к супераквальным, располагающихся в пределах литологически однородной территории, генетически связанных потоками растворенных и взвешенных веществ (по Польшину и Глазовской) и характеризующихся определенным типом миграции химических элементов (рис. 4.2).

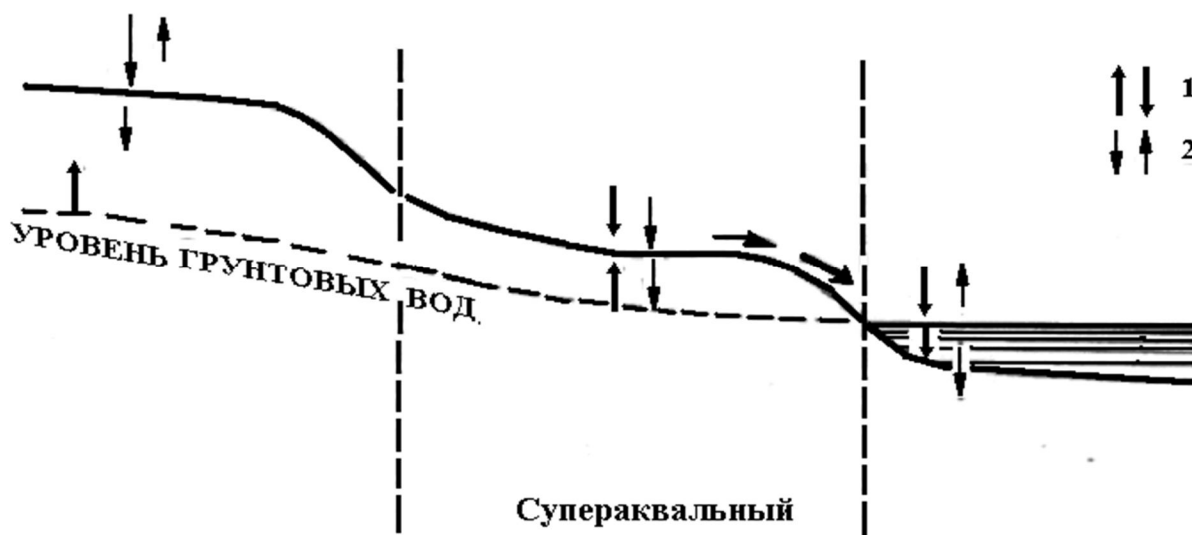


Рис. 4.2. Схема геохимического ландшафта (по Польшину):  
1-поступление веществ в ландшафт из атмосферы, грунтовых вод;  
2-удаление веществ из ландшафта в атмосферу

Эта схема (по Польшину), представляет собой первую модель ландшафта, показывающую горизонтальные связи, и является, по существу, «прародителем» полисистемной, хорической модели. Она очень существенна для анализа горизонтального распространения антропогенных *воздействий*, в частности *загрязнения*, возможностей накопления загрязняющих веществ (формирование техногенных геохимических аномалий) и *самоочищения ландшафтов*.

Интенсивность накопления определенных элементов в ландшафте или, напротив, скорость самоочищения ландшафта могут служить показателями *устойчивости* ландшафта по отношению к загрязняющим антропогенным воздействиям.

## 5. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОСНОВА СИСТЕМАТИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ

Ведущая роль в исследовании геохимии ландшафтов принадлежит А.И. Перельману. Он определяет *геохимический ландшафт* как парагенетическую ассоциацию элементарных ландшафтов (элювиальных, супераквальных и аквальных), которые сопряжены в пределах той или иной территории. Использование таксономической системы позволяет различать ландшафты со слабой контрастностью, которые состоят из элементарных ландшафтов одного и того же класса, и ландшафты с высокой контрастностью, в которых элювиальные и супераквальные ландшафты относятся к разным типам и даже разным группам. Например, в сухой степи автономный ландшафт принадлежит к группе II (степные и луговые), а подчиненный (шоровые солончаки) к группе IV (примитивно-пустынные).

Анализируя геохимическое сопряжение ландшафтов, А.И. Перельман в основу своей классификации положил миграцию элементов в элювиальном ландшафте, который в значительной мере определяет особенности всего геохимического ландшафта. Если последний зависит от специфики элювиального ландшафта (и формируется благодаря его специфике), то считается, что имеет место совершённое сопряжение. Однако часто река, ее пойма и дельта составляют особый геохимический ландшафт, сопряженный не только с ландшафтами соседних склонов и водоразделов, но и с ландшафтами всего бассейна, расположенными выше по течению реки. Русловой поток в такой речной системе должен уже рассматриваться как самостоятельная единица геохимической классификации водосборного бассейна.

Так как интенсивность миграции веществ в ландшафтах отличается сезонной изменчивостью, А.И. Перельман (1966) в основу классификации положил наиболее динамичные миграционные характеристики конкретных ландшафтов. В частности, он указывает, что для таежных ландшафтов следует в первую очередь учитывать летние миграционные процессы, а для субтропических (сероземных) степей – миграционные особенности влажного весеннего периода, когда развивается пышная эфемерная растительность. С точки зрения геохимической систематики в типе таежных ландшафтов к одному таксономическому рангу относятся и широко распространенные кислые таежные ландшафты, и очень редкие сернокислые ландшафты, развитые на участках распространения сульфидных залежей.

А.И. Перельман подразделяет ландшафты на два основных «ряда»: *абиогенные*, в которых главную роль играют процессы физического, механического и химического выветривания, и *биоогенные*, в которых миграция



элементов во многом определяется биологическим круговоротом живого вещества.

В соответствии с условиями круговорота воздушных мигрантов выделяются четыре *группы* ландшафтов:

- 1) лесные (биогенные);
- 2) луговые и степные (биогенные);
- 3) тундровые (биогенные);
- 4) примитивно пустынные (абиогенные).

В качестве основ классификации в геохимии ландшафтов принимается миграция химических элементов в элювиальных ландшафтах. По отношению к ним супераквальные рассматриваются как подчиненные.

1. *Лесные ландшафты.* В лесах происходит значительное накопление органического вещества (ОВ), объем его намного превышает ежегодную продукцию. Для лесов характерны два вида биогеохимических циклов:

а) ежегодные циклы разложения растительного опада и сопряженные процессы;

б) полный цикл отмирания деревьев в течение большого промежутка времени. В результате минеральные элементы (Ca, Mg и др.) надолго удаляются из почвы и «задерживаются» в стволах, ветвях и корнях деревьев. Растения лесов создают особый микроклимат и особый состав атмосферного воздуха с повышенным содержанием CO<sub>2</sub> и водяного пара. Основная масса ОВ в лесных ландшафтах сосредоточена над поверхностью почвы.

2. *Луговые и степные ландшафты.* В них не создается больших запасов живого вещества, общая биомасса обычно не более 30–40 т/га. Ежегодный прирост ОВ не уступает, иногда и превосходит аналогичные показатели для леса. Однако химические элементы выбывают из биологического круговорота лишь на короткий период, так как большинство растений является однолетними. ОВ, как правило, накапливается над поверхностью почвы.

3. *Тундровые ландшафты.* Для них характерна низкая ежегодная продукция; количество живого вещества - первые десятки т/га. Скорость биологического круговорота низкая, преобладают сравнительно просто организованные растительные формы. Мертвое ОВ накапливается в виде торфа.

4. *Примитивно-пустынные ландшафты.* Они отличаются еще меньшей биологической продукцией и подвижностью элементов по сравнению с тундрой. Это каменистые пустыни, шоровые солончаки и сколы, покрытые пустынным «загаром».

Основные таксономические единицы классификации А.И. Перельмана приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Основные таксономические единицы  
геохимической классификации ландшафтов  
(А. И. Перельман, 1966)

Таксономический ранг	Единица	Критерий для выделения
I	Ряд ландшафтов	Форма движения материи (физическая, химическая, биологическая), с которой связана миграция элементов в ландшафте
II	Группа ландшафтов	Биологический круговорот воздушных мигрантов: соотношение между общей массой живого вещества и ежегодной продукцией, типы организмов, осуществляющие круговорот
III	Тип ландшафтов	Биологический круговорот воздушных мигрантов: ежегодная продукция живого вещества, скорость разложения остатков организмов
IV	Семейство ландшафтов	Продукция живого вещества в пределах типа
V	Класс ландшафтов	Типоморфные элементы и ионы водной миграции
VI	Род ландшафтов	Интенсивность водообмена и механической миграции
VII	Вид ландшафтов	Второстепенные особенности миграции (подлежат уточнению)

Дадим характеристику ряда таксономических единиц, вошедших в классификацию А.И.Перельмана.

**Типы ландшафтов** выделяются с учетом особенностей растительного покрова, в частности, общей массы живого вещества, его химического состава, параметров биогеохимических циклов.

С геохимической точки зрения каждый растительный вид характеризуется особым типом биогеохимического цикла применительно к самому растению и к растительному опад.

В каждом растительном сообществе биогеохимический цикл протекает по-своему, в зависимости от типа ландшафта. А. И. Перельман отмечал, что по существу «тип растительного покрова — это особый тип биологического круговорота воздушных мигрантов, особый тип химических реакций в ландшафте» (1966). В пределах конкретной группы ландшафтов можно выделить десятки типов ландшафтов. В частности, черноземные степи, субтропические степи, альпийские луга относятся к одной группе ландшафтов.

Семейства ландшафтов соответствуют определенным сочетаниям растительности и почв и выделяются при детальном расчленении растительного

покрова. Типы и семейства ландшафтов часто связываются с широтной дифференциацией ландшафта. Так, в таежном типе ландшафта выделяют северную, среднюю и южную тайгу. Один тип ландшафтов состоит обычно из четырех или не более пяти семейств. Семейства (это видно из таблицы), как и типы ландшафтов, различаются по морфологическим признакам и по интенсивности биологического круговорота воздушных мигрантов.

**Классы ландшафтов** в пределах каждого отдельного семейства ландшафтов геохимические неоднородности связаны уже с изменчивостью интенсивности круговорота не воздушных, а водных мигрантов. Для каждого класса ландшафтов характерен определенный класс водной миграции веществ, который отличается наличием доминирующего элемента. В качестве примеров А.И. Перельман приводит Н-класс, Са-класс и Na-класс. Они формируются при доминировании этих трех элементов, которые могут быть и типоморфными (т.е. совместно и активно мигрирующими в конкретном ландшафте). Так, в южно-таежном семействе имеются ландшафты Н-, СА- и Н – Fe – класса.

В ландшафтах Н-класса почвы и воды кислые, плодородие почв низкое, воды содержат много коллоидов, из-за недостатка кальция страдают домашние животные.

В ландшафтах Са-класса плодородие почв выше, реакция почв нейтральная либо слабощелочная.

В ландшафтах Н – Fe-класса накапливается торф, биологическая продуктивность низкая.

Анализируя различия ландшафтов в пределах семейств, например, в северной тайге или южных черноземных степях, можно прийти к выводу, что здесь главная роль в дифференциации принадлежит геохимическим классам вод. Поэтому и единица геохимической классификации ландшафтов – класс – выделяется по особенностям вод. Так, в классификации появились ландшафты сернокислого, кислого, содового, глеевого и прочих классов. Но химизм вод в разных частях ландшафта не одинаков: в почвах – один, в коре выветривания – другой и т.д. Очевидно, на основе принципа централизации при выделении классов необходимо исходить из геохимических особенностей растворов верхнего горизонта А водораздельных почв.

*Сернокислые ландшафты* возникают там, где окисляются сульфиды, формируется сернокислый класс коры выветривания, образуются сернокислые водоносные горизонты, сильнокислые почвы, сернокислые поверхностные воды. Почвы и континентальные отложения в сернокислых ландшафтах обычно обогащены металлами.

Особенности почв оказывают большое влияние на биологический круговорот атомов, в частности, на флору и фауну. Например, М.А. Глазовская установила, что кора березы, растущей на солончаках в районе одного из медно-колчеданных месторождений Южного Урала, содержала

0,06 % меди (в золе) против 0,009 % на безрудном участке. В сернокислых ландшафтах растения часто содержат много железа, цинка, серебра, свинца и других металлов.

Не все организмы могут приспособиться к столь необычным условиям (низкий pH, высокое содержание тяжелых металлов в почве). Поэтому фитоценозы и зооценозы сильно отличаются в сернокислых ландшафтах от ландшафтов других классов (иной видовой состав, обилие и т. д.).

Следовательно, своеобразная геохимическая обстановка сернокислых ландшафтов создала особые условия эволюции, весьма возможно, что это особые центры видообразования, где происходил отбор на химической основе.

Весьма возможно, что некоторые виды организмов с высоким содержанием меди, цинка, свинца, серебра, золота и других металлов возникли в сернокислых ландшафтах.

Конечно, класс – таксономическая единица невысокого ранга, и поэтому в тайге сернокислые ландшафты относятся к таежному типу, в тундре – к тундровому, в пустыне – к пустынному. Интересно, что самые кислые воды характерны именно для пустынь, там выпадает очень мало атмосферных осадков, и серная кислота, образующаяся при окислении пирита и других сульфидов, почти не разбавляется.

Сернокислые ландшафты возникают не только на участках окисления сульфидных руд, но и на пиритизированных глинах и сланцах, на серных месторождениях. В вулканических районах также встречаются сернокислые ландшафты, известны здесь и солянокислые. Сернокислые ландшафты возникают и в результате хозяйственной деятельности. Например, в районах металлургических комбинатов, перерабатывающих сульфидные руды, в атмосферу поступает сернистый газ, который, окисляясь до серного ангидрида и соединяясь с водяными парами, дает серную кислоту. Поэтому в таких районах идут «кислые дожди», понижается pH почв и вод, местами в реках гибнет рыба, изреживается растительный покров. Эффективная борьба с загрязнением окружающей среды позволяет рекультивировать искусственные сернокислые ландшафты, превратить их в ландшафты другого класса. При строительстве новых предприятий следует применять прогрессивную технологию, исключаящую сернокислое загрязнение окружающей среды.

Кислые ландшафты господствуют в лесной и тундровой группах, но встречаются также в горных лугах и других типах ландшафта. Не характерны они только для степей, пустынь и сухих саванн.

В районах влажного климата при формировании ландшафта на бескарбонатных породах кислые продукты разложения растительных остатков в почвах не могут быть полностью нейтрализованы, верхние горизонты почв приобретают кислую реакцию, pH снижается до 6–5, иногда даже

до 4. Это подзолистые, бурые лесные, латеритные, красноземные, горно-луговые и прочие почвы. Грунтовые и речные воды в таких ландшафтах могут быть и слабокислыми, и нейтральными, и даже слабощелочными.

В кислой среде хорошо мигрируют многие металлы, особенно в комплексе с органическими соединениями. Поэтому в элювиальных почвах развивается кислое выщелачивание, они обедняются подвижными элементами, которые становятся дефицитными для растений и животных. Особенно характерен дефицит кальция – важного элемента скелета многих животных. Дикие и домашние животные в кислых ландшафтах часто имеют малые размеры, хрупкий скелет (ломкость костей), болеют рахитом и т. д. Птицы здесь несут мало яиц, скорлупа их тонкая.

В кислых ландшафтах наблюдается дефицит и других элементов, с чем связан характер реакции флоры, фауны, а, местами, и человека. Недостатком бора в водах объясняется широкое распространение кариеса зубов, недостатком кобальта – малокровие домашних животных, недостатком азота, фосфора, калия, магния – низкие урожаи и болезни растений. Особенно большой дефицит наблюдается в кислых ландшафтах влажных тропиков и тайги, занимающих огромные пространства на земном шаре. Эти ландшафты, вероятно, были важными центрами видообразования, в них формировались виды организмов, хорошо приспособленных к кислой среде и дефициту элементов (чай, ель, трава, кислица и др.). В кислых ландшафтах наблюдается также избыток некоторых элементов (марганец, водородный ион и др.), оказывающих вредное влияние на организмы.

*Кальциевые ландшафты* характерны почти для всех типов ландшафтов, но преобладают они в черноземных степях. Почвы в ландшафтах кальциевого класса содержат много подвижного кальция в виде  $\text{CaCO}_3$  или обменного кальция. Поэтому кислые продукты разложения органических остатков полностью нейтрализуются, почвы имеют нейтральную или слабощелочную реакцию, кислое выщелачивание отсутствует, и металлы малоподвижны. Организмы здесь полностью обеспечены кальцием, и болезней, связанных с его дефицитом, не наблюдается, в таких ландшафтах воды богаты кальцием, они чистые и прозрачные, почти не содержат растворенных коллоидов, так как кальций – сильный коагулятор. Многие металлы здесь мигрируют слабо, а абиогенные элементы – сильно (например, молибден).

В тайге и широколиственных лесах наряду с кислыми распространены и кальциевые ландшафты, например в районах распространения известняков, мергелей, красноцветов, карбонатной морены. Биологический круговорот атомов здесь всегда протекает интенсивнее, величины биомассы (Б) и продуктивности (П) большие. Животные получают достаточное количество кальция, их размеры больше, скелет крепче, яйца имеют более толстую скорлупу, у моллюсков более массивные раковины и т. д. Эти ланд-

шафты характеризуются большим плодородием почв, с них начиналось земледельческое освоение тайги, развитие культуры, рост населения.

Кальциевые ландшафты характерны для мелкосопочника и гор, реже они встречаются на равнинах.

Весьма вероятно, что кальциевые ландшафты были центрами формирования кальциефильных видов и родов растений, которые давно уже выделены ботаниками.

*Соленосные ландшафты* распространены мало и только в пустынях, где в течение длительного времени может существовать соленосная кора выветривания. Организмы здесь поставлены в крайне неблагоприятные условия, так как безводье сочетается с сильным засолением почв. Поэтому принадлежащие к данному классу соленосные горы производят впечатление крайней пустынности. Один из таких хребтов в Ферганской долине называется даже Махаута, что в переводе означает горы прокаженных.

*Ландшафты содового класса* типичны для лесостепи, степей и саванн, где они обычно встречаются на террасах рек, плоских равнинах, в озерных котловинах. Нередко это пятна площадью в десятки и сотни квадратных метров, которые, как оспины, усеивают степные равнины. К этим ландшафтам относятся солонцы и содовые озера, воды которых имеют рН более 8,5 и содержат соду. В подобных условиях легко мигрируют аниогенные элементы (кремний, молибден, селен и др.), причем многие малоподвижные металлы входят в состав растворимых анионов (иттрий, бериллий, цинк, скандий и т.д.). С другой стороны, железо, кальций, магний, стронций, барий практически неподвижны. Поэтому организмы в содовых ландшафтах поставлены в исключительно своеобразные условия сильнощелочной среды, дефицита многих важнейших элементов (особенно железа, кальция, магния), повышенного содержания непривычных редких элементов. Все это определяет возможность энергичного отбора на химической основе, формирования особых видов.

*Кислые глеевые ландшафты* широко распространены в районах влажного климата, равнинного рельефа и бескарбонатных пород. К ним относится большая часть равнинной тундры, многие таежно-мерзлотные ландшафты Восточной Сибири, таежно-болотистые равнины Западной Сибири и европейской части России, лесисто-болотистые низменности влажных тропиков и в их числе значительная часть Амазонии. Во всех этих районах в почвах развито сильное оглеение, легко мигрируют железо и марганец, в водах много растворенных органических веществ, реки и озера имеют черную и коричневую воду. Главным дефицитным элементом здесь является свободный кислород, недостаток которого определяет низкие величины биомассы и продуктивности. Интересно, однако, что их соотношение в виде показателя  $K = IgП/IgБ$  остается постоянным, что и позволяет относить кислые и кислые глеевые таежные ландшафты к одному типу.

Помимо кислорода в ландшафтах кислого глеевого класса дефицитны и другие элементы, в них избыточны вода, водородный ион, местами железо и марганец. Условия жизни для большинства организмов здесь менее благоприятны, чем в кислых ландшафтах.

Ландшафты кислого глеевого класса были широко распространены и в геологическом прошлом, особенно в конце девона и в каменноугольном периоде, в палеогене. В то время на заболоченных тропических низменностях росли леса, остатки которых дали залежи угля, известные во многих районах земного шара, в том числе и на территории нашей страны.

*Ландшафты карбонатного глеевого класса* встречаются в болотах тундры, тайги, широколиственных лесов, влажных тропиков, на участках распространения карбонатных пород, где в почвах развито карбонатное оглеение. Это также плавни южнорусских рек, некоторые тугаи (пойменные леса) в долинах рек Средней Азии, болота лесостепи, степей.

В этих ландшафтах главный дефицитный элемент — кислород, а главный тип мелиорации — осушение. После осушения территории пригодны для земледелия. Некоторые густонаселенные низменности южных стран в прошлом были ландшафтами карбонатного глеевого класса. Типоморфными элементами этих ландшафтов являются кальций, железо ( $\text{Fe}^{2+}$ ), местами марганец ( $\text{Mg}^{2+}$ ), воды также содержат растворенное органическое вещество, хотя и в меньших количествах, чем в кислых глеевых болотах.

*Содовые глеевые ландшафты* — это некоторые болота и луга в районах развития солонцов и содовых солончаков. В геохимическом отношении они почти не изучены.

*Ландшафты сульфидных (сероводородных) классов* характерны для морских побережий, подтопленных солеными водами, для солончаков и соленых озер степей и пустынь. Наиболее распространен соленосно-сульфидный класс, который известен почти во всех типах ландшафтов: от тундр до пустынь и влажных тропиков. Известны мангровые, периодически затопляемые морем болотистые низменности, где в почвах развивается десульфуризация за счет восстановления сульфатов морской воды, почва приобретает черный цвет и имеет запах сероводорода. Местами сероводород заражает приземный слой воздуха. В результате размыва красноземных и латеритных почв возвышенностей мангры обогащаются взвесью, содержащей много гидроокислов железа, которые восстанавливаются в почве с образованием черного гидротриолита. Главный дефицитный элемент мангров — кислород, на это указывают, в частности, воздушные корни растений.

**Роды ландшафтов.** Разнообразные особенности механической миграции и интенсивности водообмена положены в основу выделения родов ландшафтов. Согласно А. И. Перельману, существуют два крайних члена этого ряда таксонов. На одном конце ряда — ландшафты со слабой механи-

ческой миграцией веществ; водообмен в них замедлен; миграция веществ в растворенном состоянии имеет особенно большое значение. На другом конце ряда – ландшафты со значительной механической миграцией веществ (например, со значительным плоскостным смывом); водообмен здесь ускорен, движение поверхностных и подземных вод значительное.

Выделение родов ландшафтов происходит с учетом рельефа местности.

**Виды ландшафтов.** Для их выделения и разграничения служат частные (второстепенные) особенности миграции элементов. Так, миграция элементов, поступающих из минеральных залежей, на морфологию ландшафтов не влияет. Однако она может обуславливать видовую дифференциацию.

Разница в видах часто связана со свойствами пород, определяющих химический состав и динамику вод. Вполне понятно, что ныне антропогенные (химические и физические) изменения в ландшафтах могут стать причиной видовых различий (вблизи мест захоронения производственных и бытовых отходов, в окрестностях крупных автострад и т. д.).



## 6. ТОКСИЧНОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ (ОБЗОР)

В настоящее время известны значения количественных характеристик токсичности химических агентов, установленные на анализе зависимостей «доза – ответная реакция». К ним относятся:

- среднеэффективная доза ( $ЭД_{60}$ ) и концентрация ( $СЭ_{50}$ );
- абсолютная эффективная доза ( $ЛД_{100}$ ) и концентрация ( $СЛ_{100}$ );
- среднелетальная доза ( $ЛД_{50}$ ) и концентрация ( $СЛ_{100}$ );
- абсолютно летальная доза ( $ЛД_{100}$ ) и концентрация ( $СЛ_{100}$ ).

При этом величина  $ЛД_{100}$  – это минимальное количество агента, при воздействии которого 100 % реакции популяции оценивается по летальному эффекту (Ершов Ю.А., Плетнева Т.В., 1989).

Для измерения дозы используется массовая доля  $W$ , которая определяется отношением массы введенного вещества (элемента) к массе организма:

$$W = m_2/m_1, \text{ при } m_2 \ll m_1,$$

где  $m_1$  – масса организма;  $m_2$  масса вещества (элемента).

Сравнение токсичности одготипных соединений и изучение механизмов их действия показывает, что более адекватной шкалой количества введенного агента является молярность вещества. Она определяет отношение количества введенного вещества (элемент в молях) к массе организма:

$$B = n_2/m_1,$$

где  $n_2$  – количество вещества, моль,

$m_1$  – масса организма, кг.

Если величина доз через молярность выражается единицами измерения СИ, принимается 1 моль/кг. На практике вместо молярности применяется молярная концентрация, определяемая количеством вещества в 1 л (моль/л).

Сравнение биологической активности с числовыми значениями дозы не всегда удобно, так как эти значения отличаются до нескольких порядков. В связи с этим было принято пользоваться отрицательным логарифмами доз и выражать индекс токсичности величиной

$$pT(X) = -\log b(X),$$

где  $pT(X)$  – индекс токсичности вещества (элемента) в организме, моль/кг,  $b(X)$  молярность  $X$ ; берется десятичный логарифм.

### **Некоторые физико-химические свойства неорганических соединений в связи с их токсичностью**

Взаимодействие органических веществ с чувствительными к ним системами в биологических тканях сложно и неспецифично. Токсическое неорганическое вещество может замедлять важные метаболические функции и процессы вплоть до их полного ослабления и гибели организма. Оно способно и активировать ряд метаболических функций, и вызвать бесконтрольный рост клеток.

Некоторые высокотоксичные вещества в очень низких концентрациях стимулируют важные жизненные процессы.

Токсичность неорганического вещества измеряется его способностью оказывать воздействие на диагностические химические равновесия (квазиравновесия) в системах живых организмов (Ершов Ю. В. 1989). Влияние на эти равновесия обусловлено образованием прочных или необратимых связей с химическими компонентами тканей и клеток, главным образом с биогенными макромолекулами.

Реакционная способность вещества определяется физическими и химическими свойствами образующих его химических элементов. Свойства последних зависят от положения в Периодической системе.

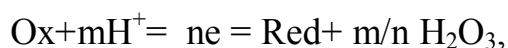
К физико-химическим свойствам, связанным с токсичностью, относятся: электроотрицательность; стандартный потенциал; степень окисления элементов в соединении; размер частиц в соединениях, особенно при отравлении через органы дыхания; растворимость и устойчивость соединений в жидких биосферах и степень гидротации образующихся ионов, гидролиз, растворимость и реакционная способность продуктов гидролиза; способность соединения существовать в твердом и коллоидном состояниях в тканях, возможность формирования хелатных комплексов.

Особенно важны электрохимические свойства, в частности, окислительно-восстановительные (редокс) потенциалы. Они находятся в соответствии с СО элемента в соединении: чем выше СО, тем большее положительное значение имеют потенциалы (Eh) у соответствующей редокс-пары.

Огромное значение в формировании свойств токсичности у неорганических соединений, в частности в биосферах, имеют степень окисления элемента и скорость, с которой неорганический ион подвергается окислению и восстановлению (стоит объяснить, что представление о том, что высокое СО соответствует более токсичным ионам, не всегда соответствует действительности (Ю.В. Ершов, 1989).

Диаграмма (рН – потенциал) показывает, какие частицы неорганических соединений термодинамически устойчивы при данных значениях рН и потенциала среды Eh.

В общем случае для окислительно-восстановительной полуреакции:



где  $O_x$  – окисленная, а  $Red$  – восстановленная форма элемента.

Есть зависимость между  $E_h$  и  $pH$  (по уравнению Нернста):

$$E_h = E^0 + mRT/nF \ln [O_x] [H^+]^Y / RED,$$

где  $E_h$  — равновесный потенциал;

$E^0$  – стандартный потенциал,  $m$ ,

$n$  – коэффициенты полуреакции (уравнение – выше – для полуреакции).

При  $37^\circ C$  (310 K) и равных активностях окислительной ( $O_x$ ) и восстановительной ( $RED$ ) форм элемента уравнение приобретает более простую форму:

$$E_h = E^0 - 0,06 m / npH,$$

где  $m$  – число ионов;  $H^{+a}$  – число катионов;  $n$  – число электронов.

Присутствие в водных растворах органических гигантов – аминокислот, белков, нуклеиновых кислот и др. – смещает  $E_h - pH$  в связи с образованием координационных соединений (и появляются новые области устойчивости, соответствующие комплексным ионам).

Значительное влияние на токсичность и биологическую активность оказывает растворимость неорганических соединений в воде и липидах. Пример: металлический ряд  $Hg$  адсорбируется через кожу вследствие растворимости в липидах. Простые соли необходимых элементов, растворимы в воде. Эффекты токсичных элементов в большей степени проявляются у растворимых солей, чем у слаборастворимых. Нерастворимые оксиды менее токсичны, чем растворимые хлориды или нитраты того же элемента.

Элементы располагаются в ряд в порядке уменьшения токсичности:

нитраты > хлориды > бромиды > ацетаты > йодиды > перхлораты > сульфаты > фосфаты > карбонаты > фториды > гидроксиды > оксиды.

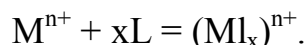
Этот ряд в целом хорошо коррелирует с растворимостью соединений.

Гидролиз растворимых солей в биосредах влияет на токсический эффект. Биологические жидкости млекопитающих характеризуются слабощелочной реакцией ( $pH = 7,4$ ), в жидкостях ЖКТ  $pH$  меняется от 1,8 до 6,0 в желудке, в кишечнике – в среднем 6,8, иногда выше 7,0 при  $pH$  характерных для биосреды, растворимые катионные соли щелочных и щелочно-земельных металлов (IA и IIA) ионизируются и существуют в виде гидротированных ионов. Катионы при этом не гидролизированы. Растворимые соли элементов групп IIIA-IVA подвергаются гидролизу до растворимых гликозидов или основных солей в зависимости от  $pH$  среды. При этом при гидролизе формируется избыток ионов оксония/гидроксония  $H_3O^+$ , вызывающий ацидоз.

Гидролиз по катиону (металлов) не происходит при комплексообразовании с биогенными лигандами (белки плазмы и др.). Токсичность неор-

ганического соединения при этом снижается. При образовании малорастворимых основных солей или гидроксидов, находящихся длительное время в кровяном русле (до фагоцитоза), это происходит из-за вероятностей ионизации продуктов гидролиза токсическое действие пролонгируется.

В энзимных биосферах катионы токсичных элементов действуют как кислоты Льюиса, т.е. кислоты — акцептор, основание — донор электронной пары:



Сила кислот Льюиса оценивается по параметру мягкости в концепции жестких и мягких кислот и оснований (ЖМКО). Параметр мягкости тем выше, чем больше значения константы образования соли Льюиса, т.е. координационного соединения  $(ML_x)^{n+}$ .

По теории ЖМКО, жесткие кислоты — это катионы, изоэлектронные атомы инертных газов ( $s^2p^6$ ). У них высокосимметричное плотное электронное облако, слабо поляризующееся под действием внешнего электрического поля анионов.

Это катионы групп IA, IIIA, IVA, катионы некоторых d-элементов.

К мягким кислотам относятся катионы d-элементов с невысоким положительным зарядом ( $Po, Ag, Cd, Rt < Au, Tl, Cu$ ). Электронная оболочка мягких кислот имеет большие размеры, легко поляризуется.

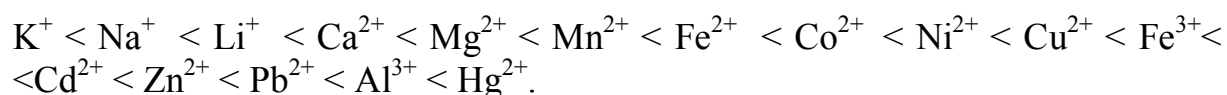
Лиганды, содержащие атомы элементов с высокой электроотрицательностью, легче поляризуются (F- и т. п.) и являются жесткими основаниями. К мягким основаниям относятся легко поляризуемые лиганды (I-, R-S, R-Se).

Теория ЖМКО гласит, что наиболее устойчивые соединения (комплексы) образуются между жесткой кислотой (ЖК) и жестким основанием (ЖО) или мягкой кислотой (МК) и мягким основанием (МО) (Ершов, 1989):

Мягкие кислоты токсичны. В частности, соли  $Pb, Hg, Cd, Tl$  — высокотоксичные вещества. По ЖМКО, мягкие кислоты  $Pb^{2+}, Hg^{2+}, Hg_2^{2+}, Cd^{2+}, Tl^+$  образуют в биосредах наиболее прочные связи с мягкими основаниями — SH и -SR.

Теория ЖМКО особо значима, когда определение константы образования комплексных соединений невозможно. Сильные затруднения возникают, когда в роли лиганда выступает макромолекула, связанная с металлом по нескольким донорным группам (хелатные комплексы). Тогда прочность связей металл-лиганд можно оценить на основании теории ЖМКО.

Из истории ЖМКО следует, что уменьшение радиуса и увеличение заряда иона должны способствовать хелатированию. В соответствии с этим неорганические ионы могут быть расположены в ряд по увеличению способности комплексообразования:



Хелаты металлов намного устойчивее, чем обычные комплексы тех же металлов с лигандами, содержащими лишь одну донорную группу (монодентантные лиганды). Устойчивость, связанная с хелатным эффектом, зависит от уже упоминавшихся физико-химических характеристик: жесткости и мягкости доноров и акцепторов, электроотрицательности атомов.

Важнейшими мишенями токсичных неорганических соединений являются белки и нуклеиновые кислоты.

Комплексообразование токсичных неорганических ионов с нуклеиновыми кислотами может протекать по типу обычной координации или путем образования хелатов. При хелатировании в образовании координационной связи участвуют два атома азота или атом азота и фосфат. Исследования *in vitro* показали, что фосфат является наиболее сильной донорной группой для ионов ряда переходных и большинства щелочно-земельных элементов. У Cu — наивысшее сродство к азоту нуклеиновых оснований. Устойчивость комплексов, в том числе комплексов ДНК, возрастает с увеличением числа фосфатных групп.

При экспозиции неорганических ядов в организме, как и при действии природных токсинов и органических ядовитых веществ, вступают в действие различные защитные механизмы. Это механизмы специфического и неспецифического характера, направленные на детоксикацию яда.

Условные рефлексы и болезненность реакций на токсические вещества (у животных) стимулируют проявление способности избегать повторных отравлений. Неорганические вещества могут (при пероральном поступлении в организм) удаляться при первичных физиологических реакциях (отхаркивание, рвота и т. д.).

При попадании токсических веществ внутрь тканей и клеток включаются механизмы генного контроля и специфических метаболических процессов, направленные на обезвреживание этих веществ. Один из путей детоксикации — биотрансформация чужеродных веществ в менее опасные, специальные метаболические процессы обычно блокированы, но быстро активизируются при отравлении. При сходстве химических и биологических свойств вредных веществ со свойствами соединений жизненно важных элементов, в детоксикации используются соответствующие гомеостатические механизмы регулирования. Механизмы биотрансформации достаточно разнообразны. В частности, широко применяются химические механизмы (Ершов и др., 1989): биологическое окисление, восстановление, гидролиз, хелатирование с образованием менее токсичных форм. При лечении отравлений неорганическими ядами часто используются комплексообразующие агенты.

## **7. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ЗАГРЯЗНИТЕЛИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Химическое и биогеохимическое антропогенное изменение окружающей среды и его глобальный характер впервые замечено и оценено В.И. Вернадским. Анализ данных, характеризующих огромную интенсивность этого процесса, позволил В.И. Вернадскому сформулировать положение о сопоставимости деятельности человечества с геологическими процессами.

А.Е. Ферсман, назвавший техногенезом геохимическое воздействие промышленности, на примере распределения годовой добычи металлов показал, что их концентрирование — лишь временный промежуточный этап процесса, конечным итогом которого является «безвозвратное распыление», рассеяние вещества. Он отмечал также, что геохимическая миграция, обусловленная технической деятельностью, превышает по скорости природные процессы.

Антропогенное рассеяние вещества, развивающееся с мощностью геологического процесса и скоростью научно-технического прогресса, привело к созданию проблемы загрязнения окружающей среды — краеугольного камня современной экологической ситуации.

Проблема загрязнения окружающей среды выявилась не как теоретическое обобщение, а как практическая задача, вызванная многочисленными отрицательными реакциями в различных областях жизни и производства. В числе таких реакций:

- 1) изменение показателей здоровья населения, рост заболеваемости, доказательно обусловленный загрязнением среды;
- 2) массовые случаи гибели гидробионтов в загрязненных водах;
- 3) непригодность по химическому составу большого числа водных источников для питьевого и технического водоснабжения, рыбохозяйственных целей, а в ряде случаев и для рекреационного пользования;
- 4) невозможность во многих случаях проведения тонких технологических операций из-за загрязнения атмосферного воздуха.

В качестве важнейших загрязнителей рассматривались: пыль, угарный и углекислый газы, окислы серы, азота, углеводорода, соединения азота, фосфора, калия, ядохимикаты, синтетические органические вещества, радиоактивные изотопы. Химические элементы, в том числе тяжелые металлы и их соединения, рассматривались в меньшей степени. Интерес к оценке химических элементов как загрязнителей резко повысился, что объясня-

ется токсичным воздействием их на биоту, и широким распространением в окружающей среде.

Особенностями влияния химических элементов на биоту является способность их к кумуляции в живых организмах, что вызывает последствия даже при воздействии низких концентраций.

Многочисленные данные свидетельствуют о высоких концентрациях химических элементов в окружающей среде в связи с техногенными или антропогенными процессами ее преобразования. Концентрации, фиксирующие антропогенные ореолы и потоки рассеяния, обнаружены ныне во всех природных средах: почвах, растениях, атмосфере, водах и донных отложениях.

По характеристике известного эколога Ю. Одума, металлы относятся к стойким загрязнителям. Для них нет природных процессов, разлагающих их с такой же скоростью, с какой они вводятся в экосистемы антропогенными процессами. Единственный способ очистки среды от металлов — изъятие или экстракция. Действительно, если большинство органических загрязнителей, фотооксидантов в неизбежно протекающих природных процессах в конце концов превращается в простые соединения, то для химических элементов процессы самоочищения окружающей среды принципиально невозможны. Они могут лишь быть разбавлены до безопасных концентраций.

В качестве прогностического показателя интенсивности участия химических элементов в техногенезе А.И.Перельманом предложено использовать понятие «технофильность химических элементов» (отношение ежегодной добычи элемента в тоннах к его среднему содержанию в земной коре). Из табл. 7.1. видно, что все наиболее известные химические элементы — загрязнители окружающей среды (углерод, свинец, сера, фосфор, ртуть, кадмий) обладают высокой (более  $10^8$ ) технофильностью.

Таблица 7.1

Показатель технофильности химических элементов  
(по А.И.Перельману, с добавлениями)

Величина показателя	Химические элементы	Участки окружающей среды, загрязняемые элементы, и некоторые последствия
1	2	3
$10^{12}$	Углерод	Рост содержаний углекислого газа в атмосфере, воздействие на климат
$10^9 - 10^{10}$	Хлор, свинец, медь, висмут, теллур	Мощные зоны загрязнения свинцом в местах концентрации транспорта и полиграфических производств и загрязнения вод городов хлоридами

Окончание табл. 7.1

1	2	3
$10^8 - 10^9$	Сера, <u>фосфор</u> , <u>цинк</u> , <u>хром</u> , олово, бром, молибден, <u>мышьяк</u> , <u>уран</u> , сурьма, вольфрам, <u>ртуть</u> , <u>кадмий</u> , серебро, селен	Сернокислотное загрязнение атмосферы, почв, водоемов (кислые дожди); «фосфотизация» почв и вод в развитых странах, концентрирующих удобрения, население, продовольствие; крупные локальные аномалии в водах и гидробионтах с острыми токсичными эффектами в зонах промышленных предприятий (ртуть, кадмий, хром), в местах применения инсектицидов (ртуть); аномалии радиоактивных изотопов с радиогенными эффектами, связанные с атомной промышленностью
$10^7 - 10^8$	Железо, марганец, барий, фтор, никель, бор, йод	Аномалии никеля в районе металлургических производств с воздействием на здоровье населения, фтористо-водородное загрязнение при производстве фосфатных удобрений и алюминия; проблема воздействия соединений фтора на озоновый слой
Менее $10^7$	<u>Алюминий</u> , натрий, калий, титан, кобальт, <u>ванадий</u> , <u>бериллий</u> и др.	Загрязнение ванадием в районах теплоэнергетических устройств, работающих на нефти и мазуте

*Примечание.* Подчеркнуты элементы, для которых надежно установлена отрицательная гигиеническая оценка в случае загрязнения окружающей среды.

Вместе с тем анализ имеющихся данных показывает недостаточность знаний о химических элементах как загрязнителях. Почти нет данных о некоторых элементах с очень высокой технофильностью (висмут, теллур, олово, бром, сурьма, вольфрам, серебро, селен). Для многих давно известных элементов-загрязнителей – меди, цинка, хрома, мышьяка, кадмия – имеющиеся данные не дают общей картины их распределения в окружающей среде.

Суммирование данных по технологическим и геохимическим свойствам химических элементов выявило их высокую опасность и привело к принципиальной переоценке их относительной значимости.

Опубликованные так называемые «стресс-индексы» загрязнителей по состоянию с 1974 г. и на перспективу показывают, что тяжелые металлы занимали второе место, уступая только пестицидам и значительно опережая двуокись кислорода и серы.



Следствием оценки явилось включение ряда химических элементов в списки приоритетных загрязнителей, исследуемых организациями и международными проектами, контролирующими окружающую среду. В США в списки элементов, определяемых в водах, включены сурьма, мышьяк, барий, бериллий, кадмий, хром, медь, железо, цинк, свинец, ртуть, никель, серебро; а среди элементов, определяемых в воздухе, – мышьяк, бериллий, кадмий, фтор, свинец, ртуть. По рекомендациям ЮНЕП (программы ООН по окружающей среде), в системах мониторинга окружающей среды должны наблюдаться ртуть, свинец (региональный и местный уровень), кадмий, фтор, мышьяк (местный уровень).

В проектах научных исследований «Биогеохимические циклы» утверждена необходимость детального анализа циклов свинца, кадмия, ртути. В проекте «Токсикология окружающей среды» предусматривается детальное исследование всех элементов, для которых современные знания свидетельствуют о их воздействии на экосистемы.

## **Влияние загрязнения химическими элементами на состояние здоровья населения**

Влияние окружающей среды, загрязненной химическими элементами, на состояние здоровья населения наиболее детально изучается в последние 30-35 лет. В действии химических элементов так же, как и других загрязнителей окружающей среды, различают два вида: специфическое, приводящее к возникновению определенных заболеваний в результате избирательного действия элементов на различные органы и системы организма (например, при действии фтора – поражение кальцинированных тканей – флюороз), и специфическое, когда действие элементов способствует росту болезней, физиологически связанных с другими факторами.

Специфическое хроническое действие установлено для многих загрязнителей, в том числе ртути, кадмия, бериллия, фтора, марганца, свинца, мышьяка. Оно проявляется только при воздействии высоких концентраций загрязнителей. При низких концентрациях, воздействию которых подвергаются значительно больше контингенты населения, проявляется хроническое действие.

Общая схема реакции населения на воздействие загрязнителей, по данным Комитета экспертов ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения), приведена на рис. 7.1.

На схеме выделено пять уровней биологических ответов организмов на воздействие токсичных веществ – от сдвигов в организме, биологическая значимость которых еще недостаточно оценена, до смертельных исходов. Поперечная пунктирная линия отделяет повышенные уровни воздействия, приводящие к заболеваниям, от более низких (с неясной биологической значимостью). Реакции организмов на воздействия невысоких уровней загрязнений часто оцениваются как защитно-приспособительные. Возникновение защитно-приспособительной реакции свидетельствует о том, что среда уже не соответствует биологическому оптимуму. При длительном существовании в условиях загрязнений среды может произойти срыв защитно-приспособительных механизмов и возникнуть то или иное заболевание.



Рис. 7.1. Спектры биологических ответов на воздействие загрязнений:  
 1 – смертность; 2 – заболеваемость; 3 – физиологические признаки болезни;  
 4 – физиологические и другие сдвиги неизвестного значения;  
 5 – накопление загрязнения в органах и тканях

Общетоксическое действие высоких концентраций тяжелых металлов на человека или животных приводит к поражению или изменению деятельности важнейших систем организма – центральной и периферической нервной системы, кроветворения, внутренней секреции и т.д. Ряд химических элементов воздействует и оказывает специфическое влияние на репродуктивную (детородную) функцию, способствует возникновению атеросклероза, злокачественных новообразований, нарушению аппарата наследственности. Действием на половые клетки обладают кадмий, хром, никель, свинец, ртуть, медь, бор, цинк, марганец, бериллий, барий. Специфические канцерогенные свойства обнаружены у кадмия, хрома, никеля, мышьяка, кобальта. Воздействие тяжелых металлов на данную популяцию

может проявиться через много лет и даже десятилетия, а также в последующих поколениях.

Важное значение для токсичности элементов имеет растворимость, которая влияет на скорость проникновения вещества в организм. При загрязнении окружающей среды повышенное количество химических элементов поступает к населению различными путями. Загрязнение сельскохозяйственных территорий, выбросы промышленных предприятий приводят к загрязнению сельскохозяйственной продукции и соответственно к увеличению суточного поступления микроэлементов. Так, содержание свинца в общем рационе крестьян, живущих около плавильного завода, превышало фоновое значение в 3-10 раз, меди в рационе жителей Баймакского медноносного района - в 3,5 раза. Загрязнение рисовых полей сточными водами рудника по добыче цинка, кадмия, свинца в бассейне р.Джиньзу (Япония) привело к увеличению содержания кадмия в суточном рационе более чем в 10 раз и вызвало тяжелое специфическое заболевание населения (болезнь итай-итай).

Применение высоких доз минеральных удобрений также приводит к увеличению содержания микроэлементов в пищевой продукции.

Поступление микроэлементов в организм с водой составляет 1-10 % их общего количества. Эффективность поглощения зависит от химической формы элемента и его соединения. Так, жидкая металлическая ртуть практически не всасывается через желудочно-кишечный тракт, а поглощение метилированных соединений ртути составляет 95 %.

Загрязнение питьевых вод химическими элементами может представить реальную опасность для жителей городов и поселков, расположенных вблизи крупных горно-металлургических предприятий, производств по выплавке металлов, рудников, химических производств, при использовании свинцовых труб в водопроводах. Например, в окрестностях комбината по производству никеля его содержание в водопроводной воде было увеличено в 50 раз по сравнению с контрольным районом, что привело к увеличению суточного поступления этого элемента в организм жителей на 4,9 мкг на 1 кг массы, или на 30 % больше обычного количества.

Питьевую воду с повышенным содержанием химических элементов потребляет значительное число жителей биогеохимических провинций в районах рудных месторождений. Заявлены специфические изменения в состоянии здоровья населения при воздействии повышенных концентраций химических элементов в воде: при концентрации свинца в водопроводной воде более 0,8 мг/л вместо предельно допустимых 0,03 мг/л – замедление неврологического развития новорожденных; при концентрации мышьяка 1,1-4,5 вместо допустимых 0,05 мг/л – эндемия хронической мышьяковой интоксикации, рак кожи, поражения периферических сосудов; при увеличении количества фтора – эндемический флюороз.

С атмосферным воздухом в нормальных условиях в организм человека поступают десятые и сотые доли процента общего количества микроэлементов, однако в условиях интенсивного загрязнения окружающей среды в населенных пунктах концентрации химических элементов превышают фоновые значения в 10-1000 раз. Соответственно возрастает и поступление токсичных элементов ингаляционным путем. Так, например, концентрация ртути в незагрязненной атмосфере находится в пределах 2-5 нг/м<sup>3</sup>; при этом ее суточное поступление составляет около 0,1 мкг. В условиях воздуха, загрязненного ртутью, среднесуточное поступление этого элемента возрастает более чем в 50 раз.

В городах и поселках с централизованной системой водоснабжения на первое место выступает загрязнение атмосферного воздуха, а не воды. Это обусловлено тем, что питьевая вода, прежде чем попасть к потребителю, проходит достаточно жесткий гигиенический контроль, тогда как качество атмосферного воздуха в условиях крупного города с множеством источников загрязнения регулируется крайне трудно и на протяжении длительного времени может оставаться неудовлетворительным.

В результате воздействия атмосферного воздуха, загрязненного химическими элементами, у населения наиболее часто проявляются неспецифические биореакции в виде увеличения общей заболеваемости и смертности, снижения средней продолжительности жизни, нарушений иммунологической реактивности организма, морфологического состава крови, физического развития детей; Эти нарушения регистрируются при содержании химических элементов в воздухе в 3-10 раз выше ПДК. Для некоторых элементов известны и случаи специфического проявления их токсического действия. Свинец воздействует на систему кроветворения, и при его содержании в воздухе 1,4-5,5 мкг/м<sup>3</sup> (ПДК = 0,3 мкг/м<sup>3</sup>) наблюдались изменения синтеза гемоглобина у детей. У детей, проживающих около металлургического завода в ФРГ, установлены отчетливые изменения в рентгеновских снимках, характерные для поражения организма свинцом. Специфические изменения слуха выявлены у детей, находящихся в зоне влияния мышьяксодержащих выбросов ТЭЦ Ш5, флюороз – у населения, проживающего вблизи криолитовых производств с выбросами фтора. Повышенная смертность от рака органов дыхания отмечена у населения, проживающего вблизи медеплавильного завода в Швеции; поражения органов дыхания у населения, подвергающегося воздействию повышенного содержания марганца в сфере влияния выбросов ферромарганцевого завода; кожные заболевания – у детей и взрослых, проживающих около алюминиевых, сталелитейных и суперфосфатных предприятий, в выбросах которых имелись примеси фтора.

Безопасные условия для здоровья населения определяются системой гигиенических нормативов качества окружающей среды, в основе которой

лежат предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ. Эти нормативы отражают максимальные качества среды. Среда, отвечающая им, не влияет на здоровье и работоспособность человека и его будущих поколений, не ухудшает гигиенические условия жизни населения.

Нормативные величины ПДК в воздухе зависят от длительности периода воздействия. Концентрация вещества, безопасная при кратковременном контакте, может оказаться опасной при более длительной экспозиции. Для атмосферного воздуха в нашей стране установлены два норматива ПДК: разовая и среднесуточная, а для ртути и мышьяка - и среднегодовая. В городах с развитой промышленностью концентрации химических элементов в воздушном бассейне превышают фоновые значения в 1,5-1000 раз, а в ряде случаев, и предельно допустимые концентрации.

Имеются многочисленные данные о гигиенически опасных уровнях загрязнения вод при превышении ПДК в десятки и сотни раз (ртуть, свинец, хром, кадмий и др.). Однако для тяжелых металлов эти уровни достоверно устанавливаются, главным образом, при длительных наблюдениях на стационарных створах.

Для почв принципы нормирования вредных веществ значительно отличаются от таковых для атмосферного воздуха, вод водоемов и пищевых продуктов. Это связано с тем, что прямое поступление вредных веществ с почвой в организм человека (почва-человек) ограничено.

Основное количество химического вещества, попадающего из почвы в организм человека, поступает не прямым путем, а через контактирующие с почвой среды: воду, воздух и растения, прежде всего, сельскохозяйственные. При нормировании концентраций химических элементов в почве учитывается токсичность для почвенной флоры и фауны, интенсивность миграции в воде, токсичность при переходе в воздух, интенсивность биологического поглощения сельскохозяйственными растениями и влияние на их пищевую ценность.

## 8. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ, КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ ОТХОДАХ И СРЕДСТВАХ ХИМИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Источниками загрязнения окружающей среды являются отходы промышленной, коммунально-бытовой, сельскохозяйственной деятельности и средства химизации.

Отходы – это непредусмотренная утечка в процессе производства и в домашнем хозяйстве материалов и энергии, стоимость которой меньше стоимости, необходимой для их сбора, транспортировки и использования. Они могут быть подразделены на жидкие и твердые отходы (отходы, преднамеренно собираемые и депонируемые), на сточные (отходы, рассеиваемые в окружающей среде в виде жидких потоков, содержащих твердые взвешенные частицы) и на выбросы (отходы, рассеиваемые в окружающей среде в виде газовых потоков, содержащих твердые и жидкие взвешенные частицы).

Побочный эффект химизации территорий в ходе природопользования возникает при применении природных удобрений, ядохимикатов и отходов, перерабатываемых на удобрения;

Объемы поступлений в окружающую среду антропогенных веществ очень велики и продолжают возрастать, приближаясь к уровню транспортировки природных веществ (табл. 8.1).

*Таблица 8.1*

Объемы транспортировки природного и антропогенного веществ  
(по данным Ковды Б.А.)

Виды выброса	Количество
Объемы транспорта природного вещества	
Общий сток, рек, т/год	$19 \cdot 10^9$
В том числе	
растворенный	$3 \cdot 10^9$
взвешенный	$16 \cdot 10^9$
Пыль, взвешенная в атмосфере, т	$10 \cdot 10^9$
Объемы транспорта антропогенного вещества, т/год	
Количество удобрений	$0,3 \cdot 10^9$
Пыль индустриальная	$0,2 \cdot 10^9$
Мусор, отходы	$20 \cdot 10^9$
Индустриальные и городские сточные воды	$2,0 \cdot 10^9$
В том числе	
растворенный сток (средняя минерализация $1 \text{ г/дм}^3$ )	$1,0 \cdot 10^9$
взвешенный	$1,0 \cdot 10^9$

Объектами окружающей среды, первоначально принимающими потоки антропогенных загрязнителей, являются воздух, вода, почва, растительный покров.

Загрязнение атмосферного воздуха в основном связано с газообразными и пылевыми выбросами промышленных предприятий и энергетических установок, автомобильным и другими видами транспорта. Загрязнение водных бассейнов происходит обычно за счет сброса в водоемы неочищенных и недостаточно очищенных сточных вод промышленными предприятиями, коммунальным и сельским хозяйством. Загрязнение почвы и растительного покрова связано с размещением твердых и жидких отходов, а также промышленными выбросами.

По типу внесения вещества в компоненты среды источники загрязнения разделяются на точечные и неточечные (площадные, линейные) по режиму внесения - на постоянные, циклические и спонтанные.

В зависимости от вида деятельности, сопровождающейся образованием отходов различают источники загрязнения, формирующиеся в ходе:

- 1) добычи твердых полезных ископаемых;
- 2) добычи горючих полезных ископаемых;
- 3) производства энергии;
- 4) промышленного производства;
- 5) коммунальной деятельности;
- 6) транспортировки;
- 7) земледелия;
- 8) животноводства;
- 9) использования продуктов природы (лесное, рыбное хозяйство).

Анализ источников загрязнения в связи с различными видами деятельности (табл. 8.2) показывает, что большей частью они носят комплексный характер, т.е. формируют несколько типов отходов, попадающих в различные компоненты окружающей среды. По режиму внесения загрязнений большинство видов деятельности относится к источникам постоянного типа.

Таблица 8.2

Общий характер источников загрязнения  
в связи с различными видами деятельности

Вид деятельности	Общий тип загрязнения	Объекты загрязнения, тип источника, режим внесения загрязнения
1	2	3
Добыча твердых полезных ископаемых	Резко преобладает минеральный в виде стоков (шахтные и рудничные воды, стоки обогатительных процессов) и твердых отходов (шламы, породные отвалы)	Почва и вода; точечный; постоянный

Продолжение табл. 8.2

1	2	3
Добыча жидких горючих полезных ископаемых	Преобладает органический в виде стоков (утечка нефти) и выбросов (утечка газообразных углеводородов), в меньшей степени минеральный в виде стоков минерализованных нефтяных вод	Почва, вода, воздух точечный; постоянный и спонтанный (катастрофические разливы)
Производство энергии	Преобладает минеральный в виде выбросов (газообразные продукты сгорания и золы уноса) и, в меньшей степени, твердых отходов (золошлаковые хранилища), стоков (охлаждающие воды)	Воздух; точечный; постоянный
Промышленное производство	Равноценно минеральный и органический, часто смешавшийся в виде твердых отходов (шлаки, осадки очистных сооружений, пыли, бракованная продукция, остатки сырья после использования полезных компонентов), жидких отходов (отработанные растворы особо токсичных веществ), выбросов (паропылегазовые)	Воздух, вода и почва; точечный для каждого отдельного объекта; площадной или линейный в случае крупных промышленных зон с объединяющимися дальними выбросами или стоком в водоток регионального значения
Коммунальное хозяйство	Централизованные выбросы горячих и токсичных производств, воздушно-пылевые неорганизованные выбросы местной вентиляции производственных помещений), стоков (промывные жидкости, отработанные растворы, условно-чистые воды после очистных сооружений)	Воздух, вода, почва; точечный для каждого; постоянный
Транспорт	Равноценно минеральный и органический в виде стоков (бытовая канализация, обычно принимающая значительную долю промышленных и ливневых вод) и твердых отходов (бытовой и строительный мусор), в меньшей степени выбросов (открытое и промышленное сжигание мусора)	Воздух, вода, почва; распределенный; постоянный



Окончание табл. 8.2

1	2	3
Земледелие	Преобладает минеральный в виде выброса (газообразные продукты сгорания с примесью аэрозольных частиц), в меньшей степени органический в виде стоков (промывочная вода с углеводородами)	Воздух, вода, почва; точечный; периодический
Животноводство	Преобладает минеральный (удобрения), в меньшей степени органоминеральный (ядохимикаты)	Воздух, вода, почва; точечный; постоянный
Использование продуктов дикой природы (лесное, рыбное хозяйство)	Преобладает органический в виде стоков и твердых отходов	—

Практически все виды деятельности и производства образуют отходы, выбросы и стоки, содержащие широкий и разнообразный комплекс химических элементов - загрязнителей. Наиболее широкая ассоциация отличает предприятия, перерабатывающие цветные металлы (комбинаты цветной металлургии, электротехнические, радиотехнические, приборостроительные заводы, гальваническое производство). Не намного меньший комплекс характеризует отходы текстильной, лакокрасочной и резинотехнической промышленности, а также коммунальные отходы. В большинстве случаев одни и те же химические элементы наблюдались и в выбросах, и в стоках.

По частоте встречаемости в отходах среди отмечаемых химических элементов преобладают цинк, медь, кадмий, ртуть, свинец, серебро, сера, олово, хром и никель.

Для каждого вида деятельности и типа промышленного производства характерен свой набор химических элементов в отходах. В то же время для многих производств значительная часть накапливающихся химических элементов качественно совпадает.

Среди средств химизации рассматриваются обычно две группы источников химических элементов:

- 1) бытовые и промышленные отходы и стоки, обогащенные тяжелыми металлами, используемые как удобрения;
- 2) микроэлементы – примеси в минеральных удобрениях, в основном в фосфорных.

Среди отходов наибольшее значение имеет бытовой мусор и осадки очистных сооружений городской канализации, используемые после компостирования.

Исследование состава компостов различных городов мира показало, что во многих случаях они многократно обогащены медью, цинком, хромом, свинцом, кадмием, ртутью и другими тяжелыми металлами. Такие работы широко проведены в ФРГ, Австрии, Швеции, США и показали необходимость контроля за содержанием тяжелых металлов.

Исследованиями микроэлементов – примесей в минеральных удобрениях установлено, что минеральное сырье – источник получения удобрений – обогащено микроэлементами, и их ассоциация зависит от типа руды: апатитовые руды концентрируют редкоземельные элементы: стронций, фтор; фосфориты (особенно вулканогенно-осадочные и морские) – фтор и тяжелые металлы, в том числе свинец, медь, мышьяк, никель, кобальт, а иногда уран, стронций; микроэлементы-примеси фосфоритов на 30-70 % сохраняются в приготовленных из них фосфорных удобрениях.

На урбанизированных территориях с позиций загрязнения среды химическими элементами наибольшую опасность представляют промышленные и коммунальные отходы, а на сельскохозяйственных территориях – средства химизации.

**Промышленные отходы.** Промышленные отходы могут быть подразделены на жидкие и твердые, преднамеренно собираемые отходы, стоки и выбросы.

Количество промышленных отходов неуклонно возрастает во всем мире. Ежегодно в мире вследствие производственной деятельности поступает в окружающую среду более 250 млн т пыли, или 700 млрд м<sup>3</sup>.

Промышленные отходы характеризуются высокими концентрациями широкого круга химических элементов, иногда в сотни и тысячи раз превышающими средние содержания этих элементов в земной коре (табл. 8.3).

Таблица 8.3

Распределение химических элементов в некоторых не утилизируемых видах промышленных отходов

Элементы	Осадки очистных сооружений гальванических производств		Металлообразивная пыль	
	Среднее содержание, г/т	Коэффициент концентраций	Среднее содержание, г/т	Коэффициент концентраций
1	2	3	4	5
Хром	22000	265	26370	318
Кобальт	14	0.8	1036	58
Никель	10000	172	779	13
Медь	16000	340	1461	31

Окончание табл. 8.3

1	2	3	4	5
Цинк	18000	217	430	5
Молибден	10	9	736	669
Серебро	70	1000	2	29
Кадмий	6000	85700		
Олово	8000	3200		3,6
Вольфрам			9	3322
Свинец	6000	374	4318	1,6
Висмут	30	3300	27	

*Примечание.* Здесь и далее за коэффициент концентрации накопления химического элемента  $K_n$  принимается отношение содержания элемента в рассматриваемом объекте к фоновому его содержанию в компонентах окружающей среды (почве, воде, донных отложениях, литосфере и т.д.). Здесь они рассчитаны относительно литосферы.

Наблюдается четкая дифференциация отходов по элементному составу: в металлоабразивной пыли кларковые содержания (т.е. средние содержания в литосфере) превышены в следующее число раз: вольфрама – 3300, молибдена – 670, хрома – 320, кобальта – 58, меди – 31, серебра – 30, никеля – 14.

*Ассоциация* элементов с высокими концентрациями связана с осадками очистных сооружений гальванических производств: кадмий (в 85700 раз), висмут (3300), олово (3200), серебро (1000) свинец (374), медь (340), хром (265), цинк (217), никель (172).

Приняв за нижний предел частоту встречаемости химического элемента 50% и коэффициент концентрации, равный 2, получаем исключительно широкую ассоциацию химических элементов, характеризующую пылевые выбросы данного района. Она включает ртуть, сурьму, цинк, медь, свинец, олово, вольфрам, молибден, никель, серебро, висмут, кобальт, хром, ванадий, кадмий (перечень в порядке уменьшения встречаемости).

Коэффициенты концентрации элементов ассоциации варьируют очень широко: для сурьмы - от 25 до 5000, вольфрама - от 10 до 10000, меди - от 3 до 370, свинца - от 3 до 385, серебра - от 2 до 1000, хрома - от 2 до 119 и т.д. Такое изменение величин коэффициентов свидетельствует, очевидно, о специфичности того или иного производства и состава выделяемой им пыли.

Высокими коэффициентами концентрации характеризуются предприятия по переработке цветных металлов, машиностроительные и металлообрабатывающие заводы, инструментальные цехи. Отходы этих предприятий характеризуются самым широким набором химических элементов; высокие значения коэффициентов имеют вольфрам, сурьма, кадмий,

ртуть (тысячи единиц), свинец, висмут, олово, медь, серебро, цинк и мышьяк (сотни и десятки единиц), никель, кобальт и другие (десятки единиц).

Большие количества свинца, мышьяка, висмута, сурьмы содержатся в отходах завода, производящего аккумуляторы, применяющего сплавы свинца с мышьяком и сурьмой.

Элементы типичной ассоциации имеют гораздо более низкие значения коэффициентов концентрации в шлах предприятий строительных материалов. Здесь, за исключением сурьмы, свинца и вольфрама, элементы имеют концентрации, не превышающие десятков единиц фона; для большинства химических элементов характерен  $K_n$  менее 10%.

Высокая степень концентрации ванадия отмечается при металлообработке, меньшая при производстве огнеупоров. Марганец обнаружен в пыли производств, где применяется сварка, при выплавке и обработке изделий из специальных сплавов, при производстве цемента; гафний – в производстве огнеупоров, литий там же и, кроме того, в производстве цемента и бетона, мышьяк – при переработке лома цветных металлов;

Твердые промышленные отходы либо вывозятся на городские свалки, либо захороняются в пределах города на территории предприятий или вблизи них. Для крупной промышленной зоны выявлено, что значительная масса химических элементов твердых отходов остается в городе. Так, на территории одного крупного приборостроительного завода за 30 лет скопилось около 75 тыс. т твердых минеральных отходов с чрезвычайно высокими содержаниями многих металлов (табл. 8.4).

Таблица 8.4

Количество химических элементов в мелкоземе свалки промышленных отходов на территории одного приборостроительного предприятия

Элементы	Запасы элементов, т	Среднее содержание, г/т	Коэффициент концентрации $K_n$
Висмут	14,4	190	2111
Кадмий	7,3	97	1386
Серебро	7,6	100	1429
Вольфрам	113,7	1504	1157
Олово	154,7	2046	818
Цинк	1512	20000	241
Медь	750	10020	215
Свинец	139,8	1849	116
Молибден	7,3	96	87
Кобальт	14,4	191	II
Сурьма	0,3	4,4	9
Никель	34,5	457	8
Хром	34,2	453	5

В промышленных стоках, сбрасываемых предприятиями в городскую канализацию или в водотоки, дренирующие территорию района, также наблюдаются высокие концентрации значительного числа химических элементов (табл. 8.5). Уровень содержаний здесь резко варьирует во времени, и для изучения распределения стока каждого предприятия требуется большая скрупулезная работа по отбору среднесуточных и среднемесячных проб на каждом выпуске.

Таблица 8.5

Химические элементы в различных видах стоков

Виды стоков	Содержание элементов, мг/дм <sup>3</sup> (коэффициенты концентрации)								
	Фтор	Хром	Медь	Цинк	Мышьяк	Стронций	Кадмий	Ртуть	Свинец
Гальваническое производство в городскую канализацию	0,2-38,0	1,0-125,0	0,4-50,2	1,0-23,6	0,002-0,0030	0,05-0,5	0,0-10,0	0,001-371	0,0-0,3
	(0,5-76)	(100-125000)	(50-6250)	(20-472)	(1-10)	(1-10)	(до 10000)	(до 371000)	До 37
Различные производства в городскую канализацию	0,5-10,4	0,01-0,5	0,01-15,0	0,05-4	0,00-0,025	0,05-2	0	0,001-0,005	0,0-10,0
	(1-21)	(1-50)	(1-1875)	(1-80)	(1-8)	(1-40)	(до 130)	(1-5)	(до 1250)
Различные производства в поверхностный сток	0,2-5,5	0,01	0,01-0,2	0,05-0,2	0,03	0,05-1,0	0,005-0,025	0,001-0,005	0,01
	(0,5-11)	-1	(1-25)	(1-4)	-1	(1-20)	(5-25)	(1-5)	(до 1)

Примечание. Кн рассчитаны относительно литосферы.

Особенно высокими содержаниями отличаются направляемые в канализацию стоки предприятий, имеющих гальванические производства. Здесь устанавливаются концентрации ртути, кадмия, хрома, меди, цинка в сотни и тысячи раз выше фоновых. Стоки, направляемые в поверхностный водоток, значительно чище. В них встречены высокие (в 10 и большее число раз выше фона) содержания меди, кадмия, стронция, фтора и повышенные - цинка и ртути. На современном этапе исключительно сложно учесть выброс и сток химических элементов путем опробования многочисленных выпусков со специальным или циклическим режимом работы. Особенно это сложно из-за огромного количества неорганизованных выбросов через местную вентиляцию, не допускающую учета. Так, например, при всех основных типах процессов обработки металлов - литейном, сварочном, кузнечно-прессовом, шлифовальном, волочильном, резании, пайке - происходит интенсивная утечка вещества. Она характеризуется в технологии коэффициентом безвозвратных потерь, достигающем 90-98 %. Часть этих потерь - легко учитываемая стружка и эпизодически учитываемые пыли в

централизованном выбросе. Большая часть потерь не фиксируется в контролируемых выпусках.

**Коммунально-бытовые отходы.** К ним относятся бытовой мусор, канализационный осадок, или осадок городских очистных сооружений поверхностного стока;

В промышленном городе ежегодно образуется 0,27 т/чел. бытового мусора (с влажностью 43 % и зольностью и около 0,3 т/чел.) канализационного осадка (с влажностью 93,5 %). Бытовой мусор большей частью вывозится на свалки либо в сыром виде, либо после сжигания на специальных заводах.

Продукты сжигания бытового мусора содержат широкую ассоциацию химических элементов (табл. 8.6). Так, здесь в сотни раз больше, чем в литосфере, висмута, олова, серебра, сурьмы, кадмия, свинца, в десятки раз больше меди и цинка.

Таблица 8.6

Концентрация химических элементов в осадках полей фильтрации

Элементы	Содержание, г/т		Коэффициенты концентрации Кн	
	средние	максимальные	средние	максимальные
Серебро	50	100	1000	2000
Кадмий	92	120	306	800
Висмут	17,5	30	58	100
Цинк	2670	5000	50	100
Медь	680	1800	24	43
Хром	745	3000	16	65
Стронций	350	680	13	24
Олово	51	200	10	40
Фосфор	10000	10000	10	10
Никель	172	275	8	14
Молибден	6	11	8	15
Свинец	173	250	7	10
Вольфрам	6	10	6	10
Иттербий	12	20	6	10
Барий	1000	1500	4	6,5
Мышьяк	20	30	3	6
Сурьма	3	10	3	10
Литий	30	40	2,5	3
Кобальт	15	30	2	3,5
Фтор	450	560	2	2,5
Бор	65	100	1,5	2,5
Бериллий	2	3	1,4	2
Ванадий	60	150	<1	2
Скандий	2	5	<1	1,5
Цирконий	400	700	<1	1,5
Титан	3600	7000	<1	1
Марганец	11000	2000	<1	1
Иттрий	8	15	<1	1

По степени концентрации и комплексу элементов бытовой мусор в сущности не уступает промышленным отходам.

Особенно обогащены химическими элементами тонкие фракции, попадающие при сжигании бытового мусора в так называемую летучую золу. В пробах, отобранных из шлей, задержанных электрофильтрами мусоросжигательного завода, были обнаружены тысячекратные кларки концентрации серебра, кадмия, олова, стократные – свинца, цинка, сурьмы, хрома, десятикратные - меди, молибдена (табл. 8.7).

Таблица 8.7

Распределение химических элементов при сжигании бытового мусора

Элементы	Среднее содержание, г/т	Коэффициент концентрации Кн
В продуктах сжигания		
Железо	171000	4
Алюминий	25500	0,3
Цинк	5600	68
Медь	4000	85
Олово	1800	720
Свинец	1600	100
Хром	640	8
Сурьма	90	180
Серебро	21	300
Кадмий	12	172
Висмут	8	890
Мышьяк	4	2,2
Ртуть	0,4	4,8
В пыли, уловленной электрофильтрами		
Серебро	100	1500
Кадмий	129	1843
Олово	3000	1200
Свинец	10000	600
Цинк	30000	350
Сурьма	96	192
Хром	760	92
Медь	660	14
Молибден	7	6
Никель	49	1
Ванадий	59	0,6
Кобальт	6	0,4
Титан	2000	0,4

Примечание. Кн рассчитаны относительно литосферы.

Очистные устройства при мусоросжигании работают с КПД 90-95 %, в связи с чем они пропускают довольно большие абсолютные массы вещества в окружающую среду. В условиях городского хозяйства мусор зача-

стую сжигается открытым способом. Таким образом, коммунальная деятельность является источником загрязнения атмосферы и почв химическими элементами.

**Осадок сточных вод** городской канализации накапливается на станциях аэрации. Этот осадок вывозится на поля в качестве эффективного удобрения.

Осадки сильно обогащены многими химическими элементами. Наиболее высокие средние коэффициенты накопления определены для серебра, кадмия, висмута, цинка, меди, хрома, стронция, олова, фосфора, никеля, молибдена, свинца. Несколько меньшие, накопления обнаружены у вольфрама и иттербия. Максимальные коэффициенты концентрации элементов в 1,5-2,0 раза выше средних встречены в единичных пробах. Таким образом, распределение элементов в канализационных осадках довольно равномерное (коэффициенты вариации элементов не превышают 30 %). Наличие в осадках высоких концентраций таких элементов, как кадмий, хром, цинк, медь, никель, свинец, позволяет считать их сильно загрязненными и токсичными. Осадки непромышленных городов загрязнены значительно слабее или вообще не загрязнены.

В устьевых частях поверхностных водотоков донные осадки содержат значительные количества химических элементов, в том числе и токсичных.

В очистных сооружениях поверхностного стока скапливается большое количество донных отложений, которое после выемки используется для засыпки оврагов, пониженных частей пойм, часто в пределах города. Содержание элементов в них достигает следующих величин, г/т: ртути 100, свинца 550, меди 10500, цинка 2350, ванадия 2100 и т.д. Средние значения содержания серебра, кадмия, меди, ртути, кобальта в 70-300 раз превышают фоновые значения; сурьмы, цинка, никеля, олова, ванадия, молибдена — до 70 раз; свинца, хрома, вольфрама до 10 раз.

Таким образом, содержания некоторых токсичных и других химических элементов в осадках очистных сооружений значительно превышают фоновые и не уступают в ряде случаев наблюдаемым в бытовых и промышленных отходах.

**Отходы энергетики.** Подавляющая часть отходов, образующихся при производстве энергии, связана с работой угольных и мазутных электростанций и состоит из выбросов (газы, золы и уноса), твердых отходов и стоков.

Сжигание топлива на электростанциях до настоящего времени является одним из основных источников загрязнения атмосферы промышленных и населенных центров газообразными продуктами сгорания и пылью.

Объемы выбросов и твердых отходов, образующихся на электростанциях, очень велики. Например, в крупном промышленном городе от-



ходов от сжигания топлива почти столько же, сколько бытовых и промышленных, вместе взятых.

Для оценки энергетики как источника загрязнения окружающей среды химическими элементами было проведено изучение состава ископаемых углей и топлив на ряде угольных и мазутных ТЭЦ.

Ископаемые угли содержат целый ряд элементов, концентрации которых меняются в весьма широких пределах. Зола углей по сравнению с литосферой обогащена многими элементами, хотя степень этого обогащения обычно невелика. Средние концентрации большинства из них в золе товарных углей близки к кларковым, максимальные превышения отмечаются для бора ( $K_c = 16$ ), иттербия (10), молибдена, мышьяка (6) (табл. 8.8).

Таблица 8.8

Накопление химических элементов в золе углей

Элементы	Кларки (по А.П. Ви- ноградову), г/т	Зола товарных углей СССР (по данным трех авторов)		Содержание (для углей США), г/т	
		Содержание, г/т	$K_c$	В золе углей	В летучей золе углей
1	2	3	4	5	6
Бериллий	3,8	5	1,4	3	12
Бор	12	190	16	75	
Скандий	10	6	0,6		
Ванадий	90	120	1,3	25	
Хром	83	45	0,5	10	280
Марганец	1000	890	0,9	50	320
Кобальт	18	18	1	5	
Никель	58	36	0,7	15	750
Медь	47	65	1,4	15	360
Цинк	83	142	1,7	50	1500
Галлий	19	16	0,8		0,59
Германий	1,4	4	3		
Мышьяк	1,8	10	5,5	5	8,8
Селен	0,05			3	3
Стронций	340	410	1,3		
Иттрий	29	33	1,1		
Цирконий	170	270	1,6		
Ниобий	20	15	0,8		
Молибден	1,1	7	6	5	
Серебро	0,07	0,07	1		
Олово	2,5	4	1,6	2	
Сурьма	0,5	0,05	0,1		1,6
Барий	650	830	1,3	500	
Иттербий	0,33	3	10		
Вольфрам	1,3	2		1,5	
Свинец	16	36	2,2	25	150
Кадмий	0,13				5,8
Ртуть	0,08				0,1

При сжигании углей большинство элементов полностью переходит в золошлаковые продукты сгорания. При этом наблюдается тенденция преимущественного накопления ряда химических элементов в тонких частицах золы, которые не задерживаются очистными устройствами и разносятся воздушными потоками на большие расстояния (табл. 8.9).

Таблица 8.9

Накопление химических элементов в золе-уносе ТЭС  
по сравнению с содержанием в золе исходного угля

Наименование ТЭС	Сжигаемый уголь	Накапливающиеся элементы (коэффициент концентрации)
Красноярская ТЭЦ	Канско-ачинский	Барий (3), галлий (2)
Троицкая ГРЭС	Экибастузский	Скандий, галлий (2)
Рефтинская ГРЭС	Экибастузский	Никель (45); хром (8), медь (4), мышьяк (4), серебро (3), стронций (2)
Бурагынская ГРЭС-2	Львовско-во-лынский	Барий (5), галлий (3), ниобий (2)
Приднепровская ГРЭС	Донецкий	Бор (17), никель, германий, барий, вольфрам, свинец (2)
Криворожская ГРЭС-2	Криворожский	Никель, серебро (2)
Молдавская ГРЭС	Донецкий	Германий, серебро (3)

Выбросы мазутных ТЭЦ отличаются очень высоким содержанием ванадия (13 кг/т, коэффициент концентрации около 200) и никеля (6 кг/т, коэффициент концентрации около 100).

В сточных водах угольных ТЭЦ определялись сера, фтор, медь, свинец, кадмий, цинк, мышьяк, хром, ртуть, алюминий, молибден. Особенно сильно загрязнение мышьяком и алюминием, концентрации которых выше предельно допустимых. Повышенные содержания по сравнению с фоновым характерны также для меди и цинка.

В целом можно отметить, что для отходов электростанций, как и для всех остальных видов отходов, характерно участие широкого комплекса химических элементов в составе загрязнителей.

#### Геохимическая роль живого вещества

При высоких температурах углеводы и другие продукты, передвигаясь из листьев в стебли, вступают в сложные реакции, в ходе которых создаются белки, жиры, алкалоиды — все разнообразие растений. Но в составе последних присутствуют не только С, О, Н, но также N, P, K, Ca и другие элементы. Растения получают их из почвы или воды. В почве элементы находятся преимущественно в виде достаточно простых минеральных соединений. В растениях же элементы входят в состав сложных органических веществ (ОВ) — в белках, нуклеопротеидах и т.д. Так происходит

процесс биогенной аккумуляции минеральных соединений, благодаря которому элементы из воды и воздуха переходят в менее подвижное состояние, и их миграционная способность снижается.

В геохимии ландшафта установлен ряд параметров для оценки геохимической роли живого вещества. С его образованием (а число живых организмов - миллионы) повысилось количество, сложность и качество информации, возник новый ее вид - **биологическая информация**. К геохимическим параметрам ландшафта относятся общая масса живого вещества (Б) и ежегодная продукция (П). Они измеряются в центнерах на гектар. По этим показателям во всех ландшафтах преобладают растения (фитомасса), а животные (зоомасса) составляют обычно менее 1-2 % (до 4-10 %). В самой же зоомассе преобладают беспозвоночные, их в 10-100 раз больше, чем позвоночных.

А.И. Перельманом предложены соотношения между ежегодной продукцией и биомассой (коэффициент Ж). Этот коэффициент различен для разных ландшафтов, в частности, для лесных, где накапливаемая биомасса намного превышает ежегодную продукцию,  $Ж = п \cdot 10$ , в степях и лугах этот коэффициент равен п, т. е. на порядок ниже, чем в лесах.

Главная масса живого вещества - это воздушные мигранты (93 %) – О, С, Н, N, причем содержание О – 70 %, а количество воды более 50 %. Меньшая часть О и Н живого вещества входит в состав белков, жиров и углеводов.

Из водных мигрантов в организмах преобладают более подвижные элементы, по распространенности составляющие в них следующий ряд:

$$Ca > Al > Re > K > 51 \text{ (в земной коре – наоборот).}$$

Кларки концентрации (КК) элементов в живом веществе, по предложению А.И. Перельмана (1975), именуется *биофильностью элементов*. Максимальная биофильность у С (7800), менее биофильны N (160) и H (70), близки между собой по этому показателю анионогенные элементы - О (1,5), Cl (1,1), S (1), P (0,75), B (0,83), Br (0,71). Наименее биофильны Re (0,002) и Al (0,0006). Следовательно, живое вещество в основном состоит из элементов, образующих газообразные и растворимые соединения, и его состав лучше коррелируется с составом гидросферы и атмосферы (Перельман, 1972, 1975).

Понять геологическую роль организмов можно, если рассматривать отдельно историю воздушных и водных мигрантов и определять содержание последних не в организме в целом, а в составе золы, так как содержание элементов в золе отличается от их среднего содержания в земной коре (растения поглощают элементы избирательно). Б.И. Полюнов предложил характеризовать интенсивность поглощения частным от деления количества элемента в золе растений на его количество в почве (породе). Это

частное А.И. Перельман предложил именовать «коэффициентом биологического поглощения» и обозначать  $A_x$ :

$$A_x = L_x / n_x,$$

где  $L_x$  — содержание элемента X в золе растений,

$n_x$  — содержание элемента X в горной породе или почве, на которой произрастает растение, кларк литосферы.

В качестве величины  $n_x$  во многих случаях рекомендуется использовать не концентрацию элемента в конкретной почве (породе), а среднее его содержание в литосфере. Содержание элементов в растениях определяется все же не составом субстрата, а систематическим положением данного растения (семейством, родом, видом). А.И. Перельман указывает, что «за время формирования вида отдельные особи произрастают на разных субстратах, в связи с чем химический состав золы отражает не столько состав породы или почвы, на которой теперь произрастает это растение, сколько состав пород и почв, на которых произрастали предыдущие поколения представителей данного вида, особенно в эпоху видообразования. Поэтому для характеристики способности к накоплению элементов следует использовать коэффициент  $A_{x1}$ , рассчитанный на кларк литосферы. Если интересует влияние растений на состав данной почвы, то следует рассчитывать  $A_{x2}$ , где  $n_x$  — содержание элемента X в конкретной почве» (1975, с. 37).  $A_x$  элементов для данного вида растения колеблется в 100-1000 раз, так как  $A_{x1}$  и  $A_{x2}$  меняются в зависимости от времени, возраста организма, почвы и др., т. е.  $A_{x1}$  и  $A_{x2}$  не являются константами.

В целом отметим, что при  $A_x > 1$  элементы накапливаются в растениях, а при  $A_x < 1$  только захватываются.

Современные бактерии, водоросли и простейшие животные накапливают множество элементов. Некоторые моллюски, ракообразные, а также водоросли содержат 10-15 % Са (в раковинах или панцирях), тогда как у большинства других организмов — лишь 0,1 и 0,001 % доли Са. Диатомовые водоросли северных озер концентрируют 51, в морской траве 0,2-0,4 % Мп; зола злаков богата SiO<sub>2</sub>, зола бобовых — Са, зола картофеля и подсолнечника — К. Имеются растения с повышенным содержанием Си, Мо. Все растения концентрируют О, Н, С, М, при расчете на золу, отдельные виды накапливают Ве, Ка, Мг, Al, Р, С1, Са, Тl, V, Сг, Мп, Ni, Со, Си, Мо, Al, Au, Pb.

Следовательно, живое вещество — это **биохимический барьер**, на котором концентрируются воздушные мигранты - С, О, Н, М, I. В некоторых биокосных телах, в частности в ландшафтах, концентрируются и водные мигранты, а если считать на золу, то на биогеохимическом барьере накапливаются Р, S, С1, Вг, В, в отдельных ландшафтах также Са, Мг, Си, Мо и многие другие.

Разработан ряд биогеохимических параметров, показывающих относительное содержание элементов в видах растений, растущих в сопостави-

мых условиях. Этим вопросам посвящены работы специалистов по био-геохимическим методам исследований А.П. Виноградова, А.Л. Ковалевского, Д.П. Малюги, Н.П. Ремезова и др..

Как известно, основная масса живого вещества находится над почвой или в ее верхнем горизонте. Поглощение химических элементов корнями происходит из всей массы почвы, в том числе и из горизонтов, в которых находятся наиболее тонкие и разветвленные корни. Поэтому после минерализации остатков растений в верхнем горизонте почв аккумулируются те элементы, коэффициент биологического поглощения которых более единицы. Чем больше  $A_{x2}$ , т. е. чем интенсивнее растение поглощает элементы из почвы, тем больше и биогенная аккумуляция их в верхнем горизонте. Самое большое биологическое накопление характерно для Р и S. Биогенным путем накапливаются Ca, K, Mg, тяжелые металлы Cu, Ni, Co, редкие элементы Mo и др. Следовательно, растение – своеобразный насос, перекачивающий элементы из нижних горизонтов почвы в верхние. Биогенная аккумуляция, таким образом, препятствует выщелачиванию химических элементов (рисунок).

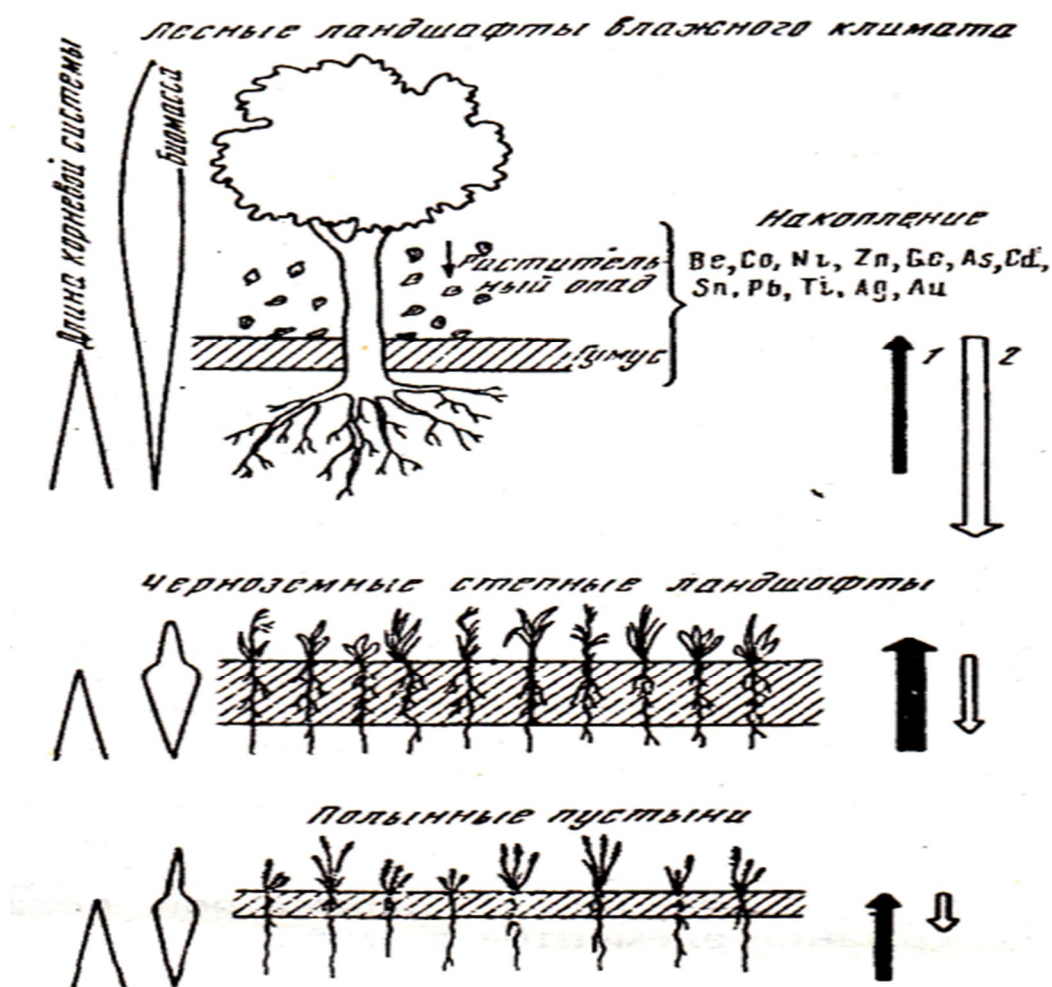


Схема взаимно противоположных процессов биогенной аккумуляции (1) и выщелачивания (2) в почвах разных ландшафтов

А.И. Перельман характеризует это как «механизм отрицательной биокосной связи, способствующей стабилизации почвы» (1975, с.51).

Соотношение биогенной аккумуляции и выщелачивания определяет строение профиля важнейших типов почв. Ширина стрелок на рисунке характеризует относительную интенсивность процессов, длина – сравнительную глубину проникновения процессов, ассоциация элементов здесь иная, и степень концентрации их значительно меньше.

**Средства химизации сельского хозяйства.** Оценка средств химизации как источника загрязнения окружающей среды произведена на примере фосфатного сырья и компостов из бытовых отходов, которые в качестве удобрения применяются в сельском хозяйстве и таким образом включаются в искусственные антропогенные потоки миграции вещества, отличающиеся от обычных природных потоков по качественным характеристикам и степени напряженности. Непрерывно возрастающие потребности сельского хозяйства в фосфатных удобрениях ставят весьма серьезную проблему рационального и экологически безопасного использования как самих удобрений, так и отходов их производства.

Общая масса фосфатного сырья очень велика, ежегодно в мире производится 18-20 млн т фосфатных удобрений, что сопровождается огромным количеством отходов, масса которых примерно в три раза больше массы полезных продуктов. В природных фосфатах из фосфоритовых месторождений наиболее обычное содержание стронция 700-2000 г/т (в 2-4 раза выше кларка), максимальные его концентрации не превышают 3000 г/т. В апатитовых скоплениях стронция намного больше - 1000-4000 г/т.

И фосфориты и апатиты отличаются очень высокими концентрациями фтора (примерно в 50 раз выше кларка).

Фосфоритовое сырье часто характеризуется также высоким содержанием урана (в 30 раз выше кларка), для апатитовых руд оно значительно ниже.

Сравнение данных по различным типам месторождений показывает, что наиболее богаты микроэлементами ракушечниковые фосфориты (табл. 8.10).

*Таблица 8.10*

Элементы-примеси в фосфатном сырье различного типа  
(обобщенные оценки по данным Томпсона, Р.А. Гилбрандсана, В.З. Елисковского, Д.Н. Шеева, В.Я. Холодова, Т.Л. Онищенко, Т.И. Степанова)

Тип месторождений	Содержание, г/т			
	Стронций	Уран	Редкоземельные металлы	Фтор
Мелкозернистый	1040-1350	50	640-900	32000
Зернистый	1300-1800	60-80		2300
Желваковый	720-2000	20-40(100)	600-1000(29000)	11000-14000
Ракушечный	2200-3000	10-20(120)	1500-2500	
Апатитовые руды	1000-4000	200-8000(26000)		20000-40000

Кроме отмеченных, в фосфатном сырье присутствуют такие элементы, как мышьяк, медь, цинк, ванадий, свинец, марганец, кадмий. Особенно характерен мышьяк, для которого коэффициент концентрации в фосфоритах около 10, а в апатитах порядка 5.

Экспериментальное исследование распределения элементов-примесей по цепи переработки основных типов фосфатного сырья установило, что в процессе обогащения фосфоритовых руд происходит накопление всех рассмотренных микроэлементов в следующем порядке: исходная руда – мытый концентрат – флотационный концентрат.

При производстве суперфосфата происходит значительное снижение содержания стронция и редкоземельных металлов, которые накапливаются в отходах – фосфогипсе, и повышение содержание – урана и иттрия. Концентрации фтора в суперфосфате близки к исходному сырью.

Таким образом, в цепи переработки фосфатного сырья происходит разделение химических элементов:

- 1) большинство элементов накапливается в промежуточных продуктах переработки (конcentратах), часто используемых как удобрение;
- 2) стронций и редкие земли концентрируются в фосфогипсе;
- 3) повышенное относительно кларка содержание химических элементов (изучены далеко не все возможные примеси) сохраняется в конечных продуктах переработки сырья – в суперфосфате и даже в фосфорной кислоте и аммофосе.

В последнее время расширяется использование в качестве удобрений продуктов переработки (компостов) хозяйственно-бытовых отходов: бытового мусора и осадков канализационных стоков. Названные виды отходов характеризуются высокой степенью концентрации химических элементов, в том числе токсичных. В процессе приготовления из этих отходов удобрений - компостов - используется вся масса канализационного осадка и большая часть массы бытового мусора. При этом из осадка в удобрение переходят все содержащиеся в нем химические элементы, а из бытового мусора - значительная их часть. Так, компост из бытового мусора разных городов обогащен по сравнению с фоновыми почвами в сотни раз ртутью, в десятки раз – серебром, сурьмой, кадмием, цинком, медью, висмутом, свинцом, оловом (табл. 8.11).

Таблица 8.11

Химические элементы в удобрениях, приготовленных из твердых бытовых отходов крупных городов

Элементы	Завод 1		Завод 2	
	Среднее содержание, мг/кг	Кн	Среднее содержание, мг/кг	Кн
Ртуть	7,5	830	9,5	1155
Серебро	10	200	3,3	66

Окончание табл. 8.11

1	2	3	4	5
Сурьма	95	86	24	22
Кадмий	II	85	7,2	70
Цинк	2640	'50	1144	22
Медь	766	28	324	12
Висмут	8,5	28	0,8	2,7
Свинец	711	27	440	17
Олово	74	14	68	13
Вольфрам	II	II	6	6
Молибден	6,3	8	2,7	3
Хром	190	4	152	3
Кобальт	10	I	10,8	I
Стронций	3	5	154	6

Согласно данным (см. табл. 8.11), осадки после фильтрации обогащены – серебром, кадмием, висмутом, цинком, медью, хромом, стронцием, оловом, молибденом, свинцом, вольфрамом. Степень концентрации элементов зависит от участия в составе общего хозяйственно-бытового канализационного стока промышленной составляющей и широко варьирует.

## Изучение источников загрязнения окружающей среды (задачи, подходы методика)

Стоки и твердые отходы, образующиеся при различных видах деятельности, являются источниками поступления в окружающую среду большого количества химических элементов, создающих избыточную нагрузку на все ее компоненты. Вместе с тем некоторые не утилизируемые отходы, по-видимому, могут быть использованы для извлечения полезных составляющих и тем самым превращены из «загрязнителей» в «сырье».

Многочисленность совместно действующих источников, сложность и разнообразие состава веществ, поставляемых ими в окружающую среду, не позволяют провести их всестороннюю оценку без предварительного изучения. Основными задачами изучения источников загрязнения являются выявление и оценка их как загрязнителей природной среды или как потен-



циального вторичного сырья. В зависимости от конкретных задач изучение источников загрязнения может быть проведено по отдельным видам отходов и с разной степенью детальности. Так, при выявлении источников загрязнения природных сред объектами изучения являются: для атмосферы – материал выбросов, для водоемов - коммунально-бытовые стоки, для сельскохозяйственных почв - применяемые удобрения, сточные воды, средства химизации и т.д.

На первых этапах исследований возможно изучение лишь наиболее объемных видов отходов (например, канализационных осадков, осадков сточных вод групповых очистных сооружений, бытового мусора) или потенциально наиболее опасных. Но ассоциации химических элементов, связанные с разными видами отходов, столь широки и многообразны, что для достаточно полной характеристики источников загрязнения необходимо выявление всех значимых источников, а также установление основных видов отходов производственной и сельскохозяйственной деятельности, обогащенных химическими элементами и потенциально перспективных для вторичной переработки, или требующих специальных условий безопасного депонирования.

Выявление источников загрязнения начинается со сбора и анализа данных о действующих в регионе (в районе, на площади) производствах, сопровождающихся образованием выбросов, стоков, жидких и твердых отходов: выясняется структура производственных узлов, преобладающие виды производств; выявляются многоотходные и вредные производства; собираются данные по не утилизируемым отходам – количеству, составу, степени токсичности, способам удаления и ликвидации, местам складирования.

Статистическая отчетность, составляемая предприятиями по выбросам и стокам, содержит сведения о количестве всех этих видов отходов и отчасти об имеющихся в них загрязнителях. Данные поступают в вышестоящие организации, статистические управления, санитарно-эпидемиологические станции, инспекции по регулированию использования и охраны вод (по стокам) и по контролю за работой газоочистных и пылеулавливающих установок (по выбросам). Хуже обстоит дело с жидкими не утилизируемыми промышленными отходами, здесь учет отходов производится эпизодически.

В архитектурно-планировочных организациях на основе обобщения данных о разных видах отходов составляются кадастры потенциальных промышленных источников загрязнения окружающей среды с указанием видов и объемов загрязнителей.

Сведения о бытовых источниках загрязнения (об объемах отходов, способах обезвреживания и утилизации) решаются в управлениях коммунального хозяйства городов.

Некоторая информация об источниках загрязнения может быть получена при изучении природных сред. Так, аномально высокие содержания

химических элементов, обнаруженные около предприятия в почвах, в растениях и снеге, могут свидетельствовать о концентрации этих элементов в выбросах предприятия и т.д. Наиболее надежны такие результаты, если они получены для отдельно стоящих предприятий, зоны влияния которых не перекрываются другими производствами.

Сбор данных продолжается и на выбранных для изучения объектах, где производятся паспортизация всех видов отходов, ознакомление с технологическими процессами, связанными с образованием отходов, уточнение количества отходов, выяснение состояния и эффективности очистных сооружений, способов удаления не утилизируемых отходов и мест их размещения.

## **Отбор, обработка и анализ проб**

Опробование является основным методом изучения источников загрязнения окружающей среды. Оно проводится с целью получения достоверных данных о составе и особенностях загрязняющих веществ.

Для изучения источников загрязнения используются методы и приемы отбора и обработки проб в зависимости от характера загрязнителей (агрегатного состояния, степени однородности и др.) и условий опробования (в отвалах, на потоке и т.д.). Рыхлые сыпучие отходы с площадок или транспортных лент могут быть изучены горстевым опробованием. Для технологических исследований во многих случаях может быть использован валовый метод.

Отбор проб производился в местах образования отходов, у транспортных средств (с конвейерной ленты, из вагонеток и др.), в местах выпуска в окружающую среду (стоки и выбросы на выходе), в местах складирования и захоронения отходов.

Некоторые виды бытовых и промышленных отходов настолько неоднородны и сложны по составу, что требуют применения специальных приемов для гомогенизации материала и подготовки проб к анализу.

Наиболее простой случай представляет опробование металло-абразивных шлей, уловленных очистными установками. Пыли характеризуются довольно равномерным распределением компонентов (табл. 8.12).

Поэтому для получения достаточно надежной характеристики состава пыли достаточно отобрать небольшое число проб (3-10).

Пробы пыли отбираются из бункеров-накопителей горстевым методом; каждая начальная проба составляется из нескольких частичных проб, отобранных из разных точек бункера. При необходимости пробы перед передачей на анализ додрабливаются до нужного размера частиц.

Таблица 8.12

Распределение химических элементов в металлоабразивной пыли

Характер производства	Коэффициенты вариации содержаний, %					
	Хром	Никель	Кобальт	Медь	Свинец	Молибден
Машиностроение	22	18	35	28	24	17
Приборостроение	32	37	15	23		24
Металлообработка	14	34	27	27	14	12

Гальванические осадки образуются при нейтрализации и обезвреживании стоков гальванических отделений предприятий. Осадки, накапливавшиеся в отстойниках, классифицируют на полужидкие с влажностью 95-99 %; обезвоженные осадки имеют влажность 60-70 % и консистенцию густой сметаны; осадки тонкодисперсные (преобладают частицы размером 0,01-0,05 мм). Обычно отстойники чистят 1-2 раза в год, иногда один раз в несколько лет, и только на небольшом количестве предприятий, где, как правило, имеются крупные гальванические отделения, отстойники чистят чаще – несколько раз в месяц и даже ежедневно.

Химические элементы в гальванических осадках распределяются равномерно (табл. 8.13).

Таблица 8.13

Распределение химических элементов в гальванических осадках

Характер производства	Коэффициенты вариации содержаний, %						
	Хром	Никель	Медь	Цинк	Кадмий	Олово	Свинец
Приборостроение		34	23	15	22		
Обработка цветных металлов	33	50	12	12		33	2435
Машиностроение для легкой промышленности	44		43	15			
Машиностроение	33	3	-3				

Повторное опробование осадков при частом удалении их из отстойника показывает, что состав осадков несколько меняется (табл. 8.14).

При длительном же накоплении осадков в отстойниках происходит усреднение их состава. Значительное изменение состава осадков, обусловленное, по-видимому, изменением технологического процесса покрытий, наблюдается только при интервалах опробования осадков в несколько лет.

Для гальванических осадков обычно достаточно отбора небольшого числа проб (3-10). При длительном накоплении осадков в отстойниках опробование может быть одноразовым; если же осадки удаляются часто, отбор проб следует производить через соответствующие интервалы времени.

Таблица 8.14

Состав гальванических осадков из отстойника  
при ежедневном удалении осадков

Дата отбора	Содержание элементов, %			
	медь	цинк	никель	хром
Осадки от хромово-кислых стоков				
10 октября	1,1	0,75	0,25	12,5
11	1,1	1	0,15	13
12	0,7	1,1	0,15	11,7
13	0,6	1	0,2	9,3
19	1	1,1	1,1	13
20	0,7	1,2	0,9	11,7
23	0,65	1,2	0,85	11,7
24	1,2	0,8	0,7	11
25	0,8	1	0,5	13,5
26	0,7	1,1	0,45	11,5
Осадки от щелочных стоков				
17	0,8	1,9	10	4,3
18	2,1	2,5	4,2	1,5
27	1,8	3	8,6	3,2
30	1,52,6	2	11	2,8
31		1,6	3,5	1,7

Пробы сырых осадков отбираются из отстойников при помощи черпака, обезвоженных осадков – из бункеров или других емкостей. Для повышения представительности проб каждая из них составляется из нескольких порций материала, отобранного с разной глубины и из разных точек отстойника или другой емкости.

Опробование производится отдельно по всем существующим на предприятиях типам гальванических осадков.

Подготовка проб осадка к анализу состоит в высушивании и измельчении материала. Разложение проб проводится кислотным методом.

Продукты сжигания бытового мусора представляют собой весьма гетерогенный и гетероморфный материал, включающий:

1) металлические предметы – консервные банки, предметы домашнего обихода, спеки и т.д.;

- 2) осколки стекла, фарфора, бетона и др. несгораемых материалов;
- 3) зольный материал.

Пробы продуктов сжигания для изучения состава отбираются на мусоросжигательном заводе с конвейера готовой продукции горстевым методом; в них включается весь материал. Пробы отбираются в течение рабочего дня, каждая представляет сумму отдельных навесок (больше 25). Затем пробы объединяются в сменные и недельные. Таким образом, каждая объединенная проба состоит из большого числа навесок, достаточного, чтобы достоверно характеризовать опробуемый материал даже при весьма неравномерном распределении химических элементов. Отбор проб проводится в течение месяца по каждому сезону года.

Из-за резкого различия физико-химических свойств отдельных компонентов пробы продукты сжигания в целом технически невозможно довести до однородного состояния, необходимого для аналитических исследований. Поэтому производится подготовка проб к анализу по схеме, позволяющей разделить продукты сжигания на однородные по физико-механическим свойствам фракции и получить надежные характеристики их состава:

- 1) разделение материала проб на классы по крупности (в мм): +40; -40—+15; -15—+2; -2—+0,3; -0,3;

- 2) разделение материала каждого класса по магнитным свойствам;

- 3) выбор включений цветных металлов.

В результате получают следующие фракции материала:

- металлические включения, разделяемые на включения черных металлов и включения цветных металлов;
- дробимые продукты, включающие немагнитный материал всех классов и магнитный материал класса -2—+0,3 мм.

Фракции, содержащие металлические включения, представлены большим количеством разнообразных предметов. Для анализа включений черных металлов крупных классов в них высверливаются сквозные отверстия, получившаяся пыль и стружка растворяются в соляной кислоте и анализируются; материал мелких классов растворяется целиком.

Фракции включений цветных металлов объединяются вместе из-за небольшого их общего количества. Навеска для анализа получается путем высверливания материала из всех включений и растворяется в соляной кислоте или смеси соляной и азотной кислот.

Дробимые немагнитные продукты (по классам крупности) перед передачей в лабораторию додрабливаются до необходимого размера частиц.

Общее содержание химических элементов в продуктах сжигания бытового мусора рассчитывается по результатам анализов путем суммирования содержаний химических элементов во всех выделенных фракциях с учетом долевого участия их в общем балансе пробы.

Опробование компоста проводится на мусороперерабатывающих заводах. Компост, приготовленный из бытового мусора, представляет собой сыпучую землистую грубодисперсную массу.

Пробы компоста отбираются с конвейера готовой продукции; еже часно в течение рабочей смены отбирается горстевым методом проба, поставленная из большого числа навесок (более 25).

Опробование выполняется в течение месяца по каждому сезону года, поскольку содержание металлов в компосте по сезонам варьирует.

Компост содержит много органики ( $C_{\text{орг}} = 45-50 \%$ ), мешающей проведению анализа, поэтому пробы предварительно озоляются. Зола компоста представляет собой неоднородный материал, основными компонентами которого являются:

- металлические включения;
- неметаллические включения (осколки стекла, фарфора и т.д.)
- тонкий зольный материал .

В связи с технической невозможностью довести до однородного состояния озоленные пробы компоста целиком, проводится ручное их разделение на перечисленные фракции с определением выхода каждой. Из-за различий систем подготовки к анализу черных и цветных металлов металлические включения разделяются вручную на соответствующие группы.

Для определения легколетучих элементов, таких, как мышьяк, ртуть, селен, используются неозоленные пробы, которые после извлечения металлической фракции, измельчаются.

Разделение сложного по составу материала позволяет получить фракции с довольно равномерным распределением основной массы химических элементов. Общее содержание каждого химического элемента в компосте определяется по результатам анализов путем суммирования содержаний элемента в тонком зольном материале, неметаллической и металлической фракциях с учетом выхода фракции и с последующим пересчетом содержаний на сухое вещество.

Методика изучения состава жидких отходов приводится на примере стоков гальванических отделений.

Для оценки степени выдержанности состава гальванических стоков на двух предприятиях были поставлены работы по изучению его динамики. Изучались необработанные стоки на выходе из гальванических отделений, стоки после обезвреживания и стоки после прохождения отстойников. Изучение сопровождалось отбором среднечасовых и среднесменных проб стоков.

Изучение показывает, что все виды стоков – промывные воды непосредственно из цехов, обезвреженные не осветленные стоки и осветленные стоки после отстойников – отличаются значительной изменчивостью содержания металлов во времени. Поэтому для характеристики стоков предприятий не могут быть использованы отдельные разовые пробы, а также

объединенные пробы, отобранные за небольшой временной интервал, например, среднечасовые. Усредненные значения содержаний металлов в стоках можно получить по среднесменным пробам или по сериям разовых проб с последующим усреднением результатов.

При организации химико-аналитических исследований проб бытовых и промышленных отходов основную сложность представляет этап подготовки проб к анализу. Для решения поставленных перед исследованием отходов задач в большинстве случаев необходимы высокоточные результаты определения широкой ассоциации химических элементов, присутствующих в довольно высоких содержаниях (выше кларковых величин и на порядок больше).

Для предварительной оценки ассоциации химических элементов используется приближенно-количественный спектральный метод, широко применяемый в лабораториях геологических организаций.

Для количественных определений, учитывая сложность состава макроосновы отходов, использование химических методов анализа из растворов неизбежно. Как правило, при анализе отходов приходится применять весьма разнообразный комплекс аналитических методов (колориметрические, атомно-адсорбционные, пламенно-фотометрические).

Некоторые трудности возникают, когда приходится на фоне высокого содержания одного элемента определять микроколичества других. В случае достаточной чувствительности метода определения микрокомпонентов этот вопрос решается разбавлением раствора. Если чувствительности не хватает, макрооснову следует сбросить любым известным аналитическим методом.

При определении концентраций летучих элементов в отходах с высоким содержанием органики наиболее эффективно разложение проб смесью кислот в бомбах на установке УТБ при температуре 160°C в течение 30 мин. Далее анализ производится по общепринятым методикам.

### **Обработка результатов изучения источников загрязнения**

Обработка данных производится с целью получения по результатам исследований и собранной информации характеристики источников загрязнения: состава и объема загрязнителей, потенциальной опасности для окружающей среды и возможностей утилизации. При этом широко используются методы математической статистики. Оценивается достоверность проведенного опробования и аналитических исследований. Составляются выборки проб по видам загрязнений и по отдельным объектам; по этим выборкам рассчитываются параметры распределения химических элементов.

Если анализ загрязнителей проводился отдельно по фракциям, классам и т.д., то сначала по результатам анализов рассчитывается содержание элементов в каждой пробе в целом с учетом выхода фракций и классов, а затем уже в группах проб, характеризующих отдельные объекты.

Результаты анализа подсушенных и озоленных проб в случае необходимости пересчитываются на исходное вещество, для чего вводятся поправки на его зольность и влажность.

Для оценки отходов и средств химизации как потенциальных загрязнителей окружающей среды состав их сравнивается с фоновыми (местным, региональным, с кларком литосферы) и предельно допустимыми концентрациями элементов в компонентах среды, подвергающихся загрязнению; подсчитываются абсолютные количества загрязнителей, и определяется создаваемая ими избыточная нагрузка химических элементов на среду.

Местный геохимический фон определяется по участкам природных сред, аналогичных изучаемым, вне зоны влияния антропогенных загрязнителей. Региональный фон определяется по серии участков, характеризующих различные районы исследуемой области. Для тех элементов, содержание которых в природных ландшафтах ниже предела чувствительности анализа, в качестве фоновых принимаются кларки элементов в осадочных породах или литосфере. Кларки элементов используются и при сравнении интенсивности источников, расположенных в различных регионах.

Отношение содержания элемента в исследуемом объекте  $C_i$  к фоновому содержанию  $C_{ф}$ , характеризующее степень аномальности распределения элемента в объекте, называется коэффициентом концентрации  $K_o$  (т.е.  $K_o = C_i / C_{ф}$ ).

Для выбросов и стоков, распределяющихся в природных средах, для которых установлены гигиенические нормы вредных компонентов, содержания химических элементов можно сравнивать с предельно допустимыми концентрациями.

Общая нагрузка, создаваемая поступлением химического элемента в окружающую среду ( $P_{э\text{ общ.}}$ ), рассчитывается по формуле:

$$K_{рэ\text{ общ.}} = C_i P_{п},$$

где  $C_i$  – содержание элемента в загрязнителе,

$P_{п}$  – общая масса загрязнителя.

Коэффициент относительного увеличения общей нагрузки элемента  $K_{ра}$  определяется относительно фонового запаса элемента  $P_{э\text{ фон}}$  по формуле:

$$K_{рэ} = \frac{P_{э\text{ общ.}}}{P_{э\text{ фон}}}.$$

Для объемных видов отходов с высокими концентрациями химических элементов подсчитывается количество содержащихся в них полезных компонентов, проводится сравнение с существующими видами минерального сырья.

В качестве сырья могут рассматриваться отходы с высокими концентрациями ценных химических элементов, даже если количество отходов



сравнительно невелико; со временем их может накопиться достаточно для использования.

Но счет количества полезных компонентов производится на основе данных о количестве отходов, их физико-технических показателях состояния (зольности, влажности, плотности) и содержания полезных компонентов. Значения показателей для подсчета принимаются по результатам замеров и лабораторных определений, а также по данным предприятий. Достоверность принятых показателей должна оцениваться.

В качестве примера приводится подсчет количества металлов в осадках очистных сооружений гальванопроизводств промышленного города, выполненный по результатам обследования и опробования осадков каждого предприятия, имеющего гальванические отделения. Количество металлов содержащихся в ежегодно накапливаемых осадках, определялось по формуле:

$$P = \frac{Qd(100 - W_1)}{100} \times \frac{C100}{100 - W_2},$$

где Q – объем ежегодно накапливающихся сырых осадков с естественной влажностью, м<sup>3</sup>;

d – плотность сырых осадков, т/м<sup>3</sup>;

W<sub>1</sub> влажность сырых осадков, %;

W<sub>2</sub> – влажность анализируемых проб осадка после подсушки, %;

C – среднее содержание металла в пробах осадка, %.

Содержание металла в пробах принималось по данным лабораторных количественных определений, значения влажности и плотности - также по лабораторным замерам». Объем осадков принимается по данным предприятий (этот показатель наименее достоверен, так как учет количества осадков предприятия не ведут). Иногда объем осадков определяется ориентировочно, исходя из емкости отстойника и времени, прошедшего после его чистки.

Суммирование вычисленных значений по всем обследованным предприятиям даст общую цифру количества металлов, заключенных в гальванических осадках города. Однако в качестве вторичного сырья, вероятно, могут использоваться не все осадки, а лишь наиболее богатые теми или иными металлами. Тогда целесообразнее объединять осадки, обладающие сходным набором элементов, находящихся в повышенных содержаниях. Количества таких осадков и заключенных в них металлов можно получить, суммируя данные только на предприятиях, осадки которых объединяются. Они показывают, что только 30-50 % всех гальванических осадков являются обогащенными металлами и, видимо, могут представлять практический интерес.

## ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ: ЖИВОЕ ВЕЩЕСТВО. РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О БИОСФЕРЕ ВЕРНАДСКОГО

Термин биосфера (от греч. *bios* — жизнь, *sphaira* — шар) введен Э. Зюссом в 1875 г. Это одна из оболочек (сфер) Земли, возникшая в ходе эволюции планеты и характеризующаяся наличием жизни. В рамках этого общего определения сложилось несколько групп различных трактовок термина: биологическая (субстратная), географическая (пространственно-субстратная) и общенаучная (эволюционно-субстратно-пространственная).

Первоначально основу понятия составляло лишь указание на совокупность всех живых организмов на Земле: при такой — **субстратно-биологической** — трактовке этого понятия охрана биосферы понималась как охрана живой природы (живых организмов).

В географических науках термин использовался для обозначения одной из геосфер, входящих в **географическую оболочку**, наряду с атмосферой, литосферой, гидросферой, но отличающихся от них насыщенностью живыми организмами (растительный покров и животный мир, сфера биоценозов) и продуктами их жизнедеятельности. Эта трактовка обозначается как **пространственно-субстратная**.

В результате работ В. И. Вернадского (1926, 1965), раскрывшего огромную геологическую роль живых организмов, жизни в целом как фактора планетарного масштаба в создании годового состава атмосферы, в формировании осадочных горных пород, вод Земли, биосферой стали называть всю ту наружную область планеты Земля, в которой не только существует жизнь, но которая в той или иной мере видоизменена или сформирована жизнью.

По своим субстратным (основным) характеристикам, указаниям на наличие вещества в трех агрегатных состояниях, перечню составных частей, участвующих в ее строении, понятие «биосфера» близко к понятию «географическая оболочка». Но понятие «биосфера» отличается не просто указанием на высокую концентрацию живых организмов, в нем выдвинута на первый план особая роль жизни. Такую трактовку можно назвать **эволюционно-субстратно-пространственной (общенаучной)**.

Стоит заметить, что и в этой общенаучной трактовке «биосферы» и в определении «географической оболочки» нередко особо подчеркивается, что возникновение и существование биосферы — принципиально важный этап планетарной эволюции Земли, подготовивший формирование **антропосферы и ноосферы**. Дадим трактовку этих терминов. Термин **антропосфера** предложен русским географом Д. Н. Анучиным в 1902 г. для обо-

значения человечества, понимаемого как целое, своеобразное, планетарное географическое явление. Употребление термина связано также с характеристикой части географической оболочки, сильно измененной человеком, как результат взаимодействия природы и общества. Но термин употребляется и для обозначения этапа эволюции географической оболочки, для которого характерна высокая роль в ее функционировании, динамике, развитии деятельности человечества.

Наконец, **ноосфера** (от греч. нооз - разум) - сфера разума. Современное понятие введено В. И. Вернадским в 1931 г. для обозначения этапа эволюции биосферы, характеризующегося ведущей ролью разумной сознательной деятельности человеческого общества в ее развитии.

### **Биогеохимические функции биосферы**

Последующие после Э. Зюсса 40 лет биосфера не привлекала внимания исследователей, и глубокой разработке этого понятия, созданию особого учения о биосфере наука обязана В. И. Вернадскому.

Вернадский стал размышлять о геологическом эффекте деятельности всей совокупности живых организмов, которую он назвал живым веществом. При таком подходе явления жизни можно было оценивать с геологических позиций, говорить о массе живого вещества так же, как о массе любой горной породы, выражать ее в тоннах. Особенно большое значение при этом приобретал энергетический подход, так как в отличие от горных пород живое вещество содержит огромное количество «действенной энергии» (по выражению Вернадского); оно совершает в земной коре большую работу, хотя и уступает горным породам по массе.

В. И. Вернадский пришел к выводу о том, что живое вещество представляет собой самую могучую геохимическую силу на земной поверхности. В 1928—1931 гг. он сформулировал очень четкие представления о пяти основных биогеохимических функциях живого вещества.

**1. Газовая.** Ученый подчеркивал, что все газы верхней части земной коры порождены жизнью. Продуктом фотосинтеза зеленых растений является свободный кислород атмосферы, а продуктом дыхания всех организмов - углекислый газ. Вернадский полагал, что и азот атмосферы имеет биогенное происхождение. Углеводороды также в значительной степени являются продуктом жизнедеятельности микроорганизмов (самый распространенный углеводородный газ метан уже давно именуется болотным газом). Сероводород, как показано выше, образуется в основном при микробиологическом восстановлении сульфатов. Вернадским отмечалась большая роль «запахов», т.е. газообразных пахучих органических соединений.

**2. Концентрационная функция** живого вещества также чрезвычайно важна - причиной этого является накопление организмами в своих телах многих химических элементов. Наглядный пример - каменные и бурые угли, торф, являющиеся концентрацией углерода (они образовались из

остатков растений в разные геологические эпохи). Среднее содержание углерода в земной коре —  $2,3 \cdot 10^2$  %, а в углях оно повышено в тысячи раз. Большинство геологов-нефтяников, разделяющих точку зрения об органическом генезисе жидких и газовых углеводородов, считают, что нефть — концентратор углерода и водорода — имеет биогенное происхождение.

Весьма показательна и контрастна концентрационная функция живого вещества в истории кальция. Известны целые горные хребты, сложенные остатками животных с известковым скелетом («Известковые Альпы» и др.), большие пространства на юге России и Украины (Нижний Дон, ряд районов Северного Кавказа, юг Украины, Крым и др.), сложенные известняками-ракушечниками. Многие здания в городах и селах построены из этого материала.

Известны организмы — концентраторы кремния. С их деятельностью связаны отложения многих кремнистых горных пород (кремнистые туфы и др.). Они состоят из остатков диатомовых водорослей, кремнистых губок и других организмов.

Морские водоросли являются концентраторами йода, концентраторами железа, марганца, серы — особые микроорганизмы; фосфора — позвоночные организмы и т. д. Такое распространенное в подземных водах азотное соединение, как ион аммония, также связано с концентрационной ролью живого вещества. В глубоких слоях крупных платформенных впадин (артезианских бассейнов) количество этого соединения достигает величин в сотни мг/дм<sup>3</sup>, на больших глубинах в условиях хорошей гидрогеологической закрытости (отсутствует связь с факторами земной поверхности и, следовательно, нет их влияния на глубокие воды) этот ион не подвержен процессу денитрификации. Существует мнение, что источником этого соединения является особый тип белкового вещества, строение которого еще не до конца ясно.

**3. Окислительно-восстановительная функция** играет важную роль в истории многих элементов с переменной валентностью. Такие процессы, как окисление и восстановление железа, марганца, серы, связаны с деятельностью микроорганизмов. Окислительно-восстановительная функция живого вещества весьма важна и в истории таких элементов, как азот (нитрификация в условиях свободного доступа кислорода), медь, кобальт, молибден, ванадий, уран, селен и др.

**4. Биохимическая функция** включает, по В.И. Вернадскому, такие явления, как рост, размножение, перемещение живых организмов, имеющие большое геологическое значение, так как приводят к быстрому распространению живых организмов. Это явление В.И. Вернадский назвал «давлением жизни».

**5. Биогеохимическая деятельность человечества.** Как утверждает А.И. Перельман, это большая и самостоятельная область фактов, которые уже выходят за пределы понятия о биокосных системах.

В.И. Вернадский рассмотрел деятельность живого вещества за всю геологическую историю нашей планеты. Он установил, что организмы создали современную азотно-кислородную атмосферу, изменили состав литосферы и гидросферы. Поэтому та часть Земли, где работает живое вещество, рассматривалась В. И. Вернадским как особая оболочка нашей планеты - биосфера. К ней он относил тропосферу, Мировой океан, литосферу до глубины в несколько километров. Учение о геологической работе живого вещества было оформлено В.И. Вернадским в новую самостоятельную науку - биогеохимию. В нее, среди других основополагающих звеньев (в их число можно включить и появившийся еще в 30 – 40-х годах биогеохимический метод поисков полезных ископаемых), вошло фундаментальное представление о «биокосных телах» - подсистемах биосферы. Тем самым на новый уровень было поднято и докучаевское учение - был вскрыт сам механизм деятельности биокосных систем.

Противники биогеохимических идей В. И. Вернадского считали, что он сильно преувеличил роль живого вещества. Считая, что ведущее значение в «процессе минерального образования» имеют неорганические факторы, они не учитывали, что сами эти факторы: рН вод, содержание СН<sub>4</sub>, СО<sub>2</sub> и других активных веществ в окружающей среде являются не чем иным как эффектом влияния работы живого вещества, причем не только ныне, но и в течение геологического времени («следами былых биосфер»).

Недооценка роли живого вещества в земной коре, как отмечал еще Б.Б. Полюнов, связана с тем, что часто о роли того или иного фактора привыкли судить по его массе. Масса живого вещества действительно ничтожна по сравнению с массой косного (неживого) вещества. Приведем доказательства известных исследователей. Первое принадлежит В.М. Гольдшмидту. Он утверждал, что «если литосферу представить себе в виде каменной чаши весом 13 фунтов, то вся гидросфера, которая поместится в ней, будет весить 1 фунт, масса атмосферы будет соответствовать медной монете, а живого вещества – почтовой марке». Однако эта «почтовая марка» постоянно образуется и разрушается, переводя каждый раз солнечную энергию в химическую работоспособную форму. Если подсчитать всю массу живого вещества, которое было на Земле хотя бы за миллиард лет, то она уже превысит массу земной коры. Действительно биомасса Земли (сухое вещество) составляет  $2,44 \cdot 10^{11}$  т, т. е. 0,00001 % земной коры ( $2 \cdot 10^{19}$  т), ежегодная продукция живого вещества близка к  $2,32 \cdot 10^{11} \cdot 10^{19} = 2 \cdot 10^9$ , т. е. в 10 раз больше массы земной коры. А если учесть, что живое вещество – это химически чрезвычайно активная «действующая масса», то станет понятной и его грандиозная энергетическая роль.

Так выявляется ведущая роль живого вещества в верхней части земной коры, в биосфере. Это положение А.И. Перельман предложил именовать законом Вернадского. В формулировке А.И. Перельмана он сводится к следующему: «миграция химических элементов на земной поверхности и в биосфере в целом осуществляется или при непосредственном участии живого вещества (биогенная миграция), или же она протекает в среде, геохимические особенности которой (кислород, углекислый газ, сероводород и т. д.) преимущественно обусловлены живым веществом как тем, которое в настоящее время населяет данную биокосную систему, так и тем, которое действовало на Земле в течение всей геологической истории».

В настоящее время учение Вернадского о биосфере приобрело и большое практическое значение, особенно в связи с проблемой борьбы с загрязнением окружающей среды. Оно признано повсеместно в нашей стране и за рубежом.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### К разделу 1.

1. Вспомните, что такое химические элементы, ионы. Какие они могут давать соединения?
2. Дайте понятия кларка, кларков концентрации, типоморфных элементов, геохимических обстановок.
3. В чем заключается принцип подвижных компонентов?
4. Рассчитайте кларки концентрации 5 элементов с высокими и 5 элементов с низкими кларками в разных средах (породах, почвах, воде), пользуясь геохимическими справочниками; сравните результаты; сделайте выводы.

### К разделу 2.

1. Какие элементы, содержащиеся в земной коре, называются главными?
2. В каком состоянии находятся в кристаллическом веществе атомы этих элементов?
3. В каких концентрациях (%) в земной коре присутствуют химические элементы, не относимые к главным?
4. Все или не все элементы находятся в рассеянном состоянии?
5. Что означает термин «рассеянные элементы»?
6. Насколько важна роль рассеянных химических элементов высокодисперсных частиц (менее 0,001 мм)?
7. Как велик биологический круговорот? Связаны ли биологическая и водная миграция?
8. Что характеризует коэффициент биологического поглощения?

### К разделу 3.

1. Дайте понятие миграции.
2. Покажите формулу для определения коэффициента водной миграции. Выполните расчет этого коэффициента при разных значениях минерализации воды и для разных элементов, содержащихся в водах. Составьте и охарактеризуйте ряды интенсивности миграции.
3. Дайте определение геохимического барьера. Какие виды барьеров вам известны?
4. Какие вы знаете типы концентрации элементов на геохимических барьерах? Охарактеризуйте каждый из этих типов.
5. Геохимическая классификация элементов по особенностям их гипергенной миграции.
6. Каковы взаимосвязи между коэффициентом водной миграции и общими оценками распространенности химических элементов?

7. Типы физико-химических барьеров в порядке их значимости для:
  - а) влажного тундрового ландшафта;
  - б) степного ландшафта гумидного пояса;
  - в) пустынного ландшафта аридного пояса.
8. Что означает понятие «элементарный ландшафт»?
9. Что означает понятие «геохимический ландшафт»?
10. В чем общность и различие географического и геохимического подходов к определению и изучению ландшафта?
11. Какие вы знаете схемы типизации ландшафтов на геохимической основе? Дайте их характеристику, приведите описание одного ландшафтного профиля (расчленение на элементарные ландшафты и описание).
12. Может ли геохимическая классификация А.И. Перельмана использоваться для изучения всех типов ландшафтов, включая техногенные?

#### **К разделу 4.**

1. На какие классы подразделяются все природные и синтетические вещества?
2. Какое фундаментальное научное обобщение является основой классификации неорганических веществ?
3. Какие элементы (группы элементов) относятся к органическим и неорганическим веществам?
4. В чем (кратко) состоят процессы поступления неорганических веществ в организм, их распределение, превращение и выведение?
5. Каков состав человеческого организма на молекулярном уровне?
6. Какие элементы входят в состав органических компонентов тела (в качественном отношении)?
7. Чем определяется токсичность элемента?
8. Какие элементы в организме индексируются «жизненно необходимыми»?
9. В чем заключаются основные принципы оценки токсичности неорганических веществ?
10. Как связана токсичность и физико-химические свойства неорганических веществ?



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Анучин В.А. Теоретические проблемы географии: монография. М.: 1960.
- Берг Л.С. Географические зоны Советского Союза. М.: Географгиз, 1948. 510 с.
- Берг Л.С. Фации, географические аспекты и географические зоны: монография // Изв. ВГО, 1945. т. 77. Вып. 3.
- Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружение: монография. М.: Наука, 1965. 272 с.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. Геохимия, 1962. № 7.
- Глазовская М.А. Ландшафтно-геохимические системы и их устойчивость к техногенезу. Биогеохимический циклы в биосфере: монография. М.: Наука, 1976.
- Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь: монография. М.: Сельхозгиз, 1936. 117 с.
- Ершов Ю.А., Плетнева Т.В. Механизмы токсичного действия неорганических соединений // Медицина, М.: 1989.
- Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972.
- Перельман А.И. Биокосные системы Земли: монография. М.: Наука, 1977, 392 с.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1975, 392 с.
- Полынов Б.Б. Учение о ландшафтах: монография // Вопросы географии. Вып. 33. М.: 1953. С. 30-44.
- Сукачев В.Н. Избранные труды. М.: Наука, 1972-1975. Т. 1, 2. 419 с.

## Рекомендуемая литература

- Арманд, Д.Л. Балльные шкалы в географии [Текст]: монография / Д.Л. Арманд // Изв. АН СССР. Сер. География., 1973. № 2. С. 111-123.
- Арманд, Д.Л. Наука о ландшафте [Текст]: монография / Д.Л. Арманд; М.: Мысль, 1975. 287 с.
- Башаркевич, И.Л. и др. Средние содержания малых химических элементов в ископаемых углях [Текст] // Доклад VIII международного конгресса по органической геохимии. М., 1978.
- Беус, А.А., Тихонова, Н.В., Грабовская, Л.И. Геохимия окружающей среды [Текст] / А.А. Беус, Н.В. Тихонова, Л.И. Грабовская. М.: Наука, 1976.

Бобров, Р.В. Лесная эстетика [Текст]: учеб. пособие / Р.В. Бобров. М.: Агропромиздат, 1989. 191 с.

Боговая, И.О., Фурсова, Л.М. Ландшафтное искусство [Текст] / И.О. Боговая, Л.М. Фурсова: М.: Агропромиздат, 1980. 223 с.

Бощерева, Л.Г. Ландшафты, металлы и человек [Текст] / Л.Г. Бощерева. М.: Мысль. 1976.

Будрюнас, А.Р. Карта эстетических ресурсов ландшафта Литвы и принципы ее составления. Экология и эстетика ландшафта [Текст]: монография / А.Р. Будрюнас, К.И. Эрингс. Вильнюс: Минтис, 1975. С. 184-195.

Волков, А.Д. Рекреационная оценка и районирование лесных территорий на ландшафтной основе [Текст] / А.Д. Волков, А.Н. Громцев // Лесоведение, 1993. № 1. С. 10-16.

Вредные вещества в промышленности [Текст]. Л.: Химия, 1977.

Гегель. Работы разных лет [Текст] / Гегель. М.: Мысль, 1970. Т. 1.

Григорьев, А.А. Зоны географические. Краткая географическая энциклопедия [Текст] / А.А. Григорьев. М.: 1961. Т. 2.

Григорьев, А.А. О периодическом законе географической зональности [Текст]: монография / А.А. Григорьев, М.И. Будыко // Докл. АН, изд. АН СССР, 1956. Т. 110.

Григорьев, А.А. Современное состояние теории географической зональности [Текст]: монография / А.А. Григорьев. М.: Советская география, 1960.

Грушко, Я.М. Вредные неорганические соединения в промышленных сточных водах [Текст] / Я.М. Грушко. Л.: Химия. 1979.

Гумилев, Л.Н. Ландшафт и этнос [Текст] / Л.Н. Гумилев // Статьи и работы 1949-1990 гг.

Добровольская, В.В. Рассеянные металлы в природе [Текст] / В.В. Добровольская. М.: Знание, 1979.

Докучаев, В.В. Учение о зонах природы [Текст]: монография / В.В. Докучаев. М.: 1958. 64 с.

Ефремов, Ю.К. Ландшафтная сфера Земли [Текст]: монография / Ю.К. Ефремов // Изв. ВГО, 1959. Т. 91. № 6.

Исаченко, А.Г. Методы прикладных ландшафтных исследований [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Исаченко. Л.: Наука, 1980. 222 с.

Исаченко, А.Г. География сегодня [Текст]: монография / А.Г. Исаченко. М.: 1979. 160 с.

Исаченко, А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Исаченко. М.: Высш. шк., 1989, 1991. 160 с.

Исаченко, А.Г. Основные вопросы физической географии [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Исаченко. Л., 1953.

Калашникова, О.В. Квалиметрический подход к эстетической оценке ландшафтов [Текст] / О.В. Калашникова, Е.Н. Рябинин // Рекреационная география Азиатской России: Современное состояние и перспективы развития: тез. научн. конф. Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 2000. С. 58-59.

Калашникова, О.В. Пейзажеобразующее значение элементов ландшафтной структуры [Текст] / О.В. Калашникова // Проблемы геологии и географии Сибири. Материалы научной конференции. Вестник ТГУ № 3, 2003. С. 90-93.

Калесник, С.В. Общие географические закономерности Земли [Текст]: монография / С.В. Калесник; М.: Изд. АН СССР, 1970. 283 с.

Ковда, В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком [Текст] / В.А. Ковда // Биогеохимические циклы в биосфере. М. Наука, 1976.

Костюкова, Т.А. Эстетические ресурсы природы и их оценка [Текст] / Т.А. Костюкова // Актуальные проблемы социальной экологии. Хабаровск: ЦНТИ, 1989. С. 17-20.

Крауклис, А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения [Текст]: монография / А.А. Крауклис. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1979. 231 с.

Леонардо да Винчи. Естественнаучные произведения [Текст] / Леонардо да Винчи. М.: Изд. АН СССР, 1955.

Лихачев, Д.С. Поэзия садов [Текст]: монография / Д.С. Лихачев. М.: Согласие, 1998. 365 с.

Лосев, А.Ф. Эстетика природы [Текст]: монография / А.Ф. Лосев, М.А. Тахо-Годи. М., 1988. 170 с.

Меллума, А.Ж. Особо охраняемые природные объекты на староосвоенных территориях [Текст]: монография / А.Ж. Меллума. Рига: «Зинанте», 1988, 224 с.

Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды [Текст]. М., 1982.

Мильков, Ф.Н. Ландшафтная сфера Земли [Текст]: монография / Ф.Н. Мильков. М.: Мысль, 1970. 207 с.

Мильков, Ф.Н. Словарь-справочник по физической географии [Текст]: учеб. пособие / Ф.Н. Мильков. М.: Мысль, 1970. 400 с.

Мильков, Ф.Н. Человек и ландшафты [Текст]: учеб. пособие / Ф.Н. Мильков. М.: Мысль, 1972. 48 с.

Моисеев, В.С. Ландшафтная таксация и формирование насаждений пригородных зон [Текст]: учеб. пособие / В.С. Моисеев, Н.М. Тюльпанов, Л.Н. Яновский [и др.]. Л.: Стройиздат, Ленинград. отд., 1977. 224 с.

Нееф, Э. Теоретические основы ландшафтоведения [Текст]: монография / Э. Нееф. М.: Прогресс, 1974.

Незерюхина, Л.Р. Нарушение макроэлементного обмена и пути его коррекции [Текст] / Л.Р. Незерюхина, Н.И. Гринкевич. М.: Наука, 1980.

Нехуженко, Н.А. Основы ландшафтного проектирования и ландшафтной архитектуры [Текст]: учеб. пособие / Н.А. Нехуженко. СПб.: Нева, 2004. 192 с.

Николаев, В.А. Ландшафтоведение. Эстетика и дизайн [Текст]: учеб. пособие / В.А. Николаев; М.: Аспект пресс, 2003. 170 с.

Николаев, В.А. Проблемы регионального ландшафтоведения [Текст]: Учебное пособие / В.А. Николаев. М.: Изд. Моск. ун-та, 1979.

Озерков, Д. Прекрасная природа – это умелая живопись. Об одном пассаже из «Диалогов о живописи» Висенте Кардуччо [Текст] / Д. Озерков // Доклад на XXII Сервантесовских Чтениях. Санкт–Петербург: Пушкинский Дом, 2000. 100 с.

Охрана ландшафтов [Текст]: толковый словарь. М.: Прогресс, 1982. 272 с.

Пашканг, К.В. Практикум по общему землеведению. [Текст]: учеб. пособие / К.В. Пашканг. Изд. 3. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982. 223 с.

Поморов, С.Б. Охрана природы градостроительными средствами в условиях региона [Текст] / С.Б. Поморов. Новосибирск: Известия вузов «Строительство и архитектура», 1988. С. 43-47.

Поморов, С.Б. Оценка привлекательности ландшафтов [Текст] / С.Б. Поморов, В.С. Ревякин, Д.В. Кантеев, Н.Ф. Вдовин [и др.] // Белокурихинская лечебно-оздоровительная местность. Барнаул: НИИ ГП, 1997.

Преображенский, В.С. Ландшафты в науке и практике [Текст] / В.С. Преображенский. М.: Знание, 1981. 48 с.

Райх, Е.Л. Принципы и методы медико-географического изучения качества окружающей человека среды [Текст] / Е.Л. Райх // Изв. АН СССР, сер. География, 1979. № 3.

Рекомендация Юнеско «О сохранении красоты и характера пейзажей и местностей» (Подписана в Париже 11.12.1962. 12 сессия Генеральной конференции ЮНЕСКО).

Рихтер, Г.Д. Система природных территориальных комплексов Земли [Текст] / Г.Д. Рихтер // Изв. АН СССР, сер. География, 1969. № 5.

Рубцов, Л.И. Проектирование садов и парков [Текст]: учеб. пособие / Л.И. Рубцов. М.: Стройиздат, 1979. 184 с.

Саушкин, Ю.Г. Геосистемы и геоструктуры [Текст] / Ю.Г. Саушкин, А.М. Смирнов // Вестн. Московского ун-та. сер. География. 1968. № 5.

Солнцев, Г.К. Методико-статистический подход к оценке привлекательности лесных рекреационных ландшафтов [Текст] / Г.К. Солнцев, Л.Г. Король, А.С. Маргамов // Лесн. хоз-во, 1992. №5. С. 25-27.

Солнцев, Г.К. Функциональная оценка рекреационных свойств лесных территорий [Текст] / Г.К. Солнцев, Л.Г. Король, А.С. Маргамов // Лесн. хоз-во, 1995. № 3. С. 19-21.

Солнцев, Н.А. Некоторые дополнения и уточнения в вопросе морфологии ландшафта [Текст] / Н.А. Солнцев // Вестн. Моск. ун-та, сер. География. 1961. № 3.

Солнцев, Н.А. О морфологии природного географического ландшафта [Текст] / Н.А. Солнцев // Вопросы географии, вып. 16. 1949. С. 61-86.

Сочава, В.Б. Введение в учение о геосистемах [Текст]: монография / В.Б. Сочава. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.

Табаксблат, Л.С. Ландшафтоведение [Текст]: учеб. пособие: переизд. Л.С. Табаксблат, Л.И. Аткина. Екатеринбург: УГЛТУ, 2010.

Табаксблат, Л.С. Основы почвоведения и геохимии ландшафта [Текст]: курс лекций / Л.С. Табаксблат; Изд. 2-е испр.и. доп. Екатеринбург, 2002, 242 с.

Табаксблат, Л.С. Особенности гидрогеохимических условий уральских горнопромышленных ландшафтов [Текст] / Л.С. Табаксблат// Экологические проблемы. Взгляд в будущее. Ростов н/Д: Ростовский гос. ун-т, 2006. С. 204-209.

Таран, И.В. Классификация рекреационных лесных ландшафтов Западной Сибири [Текст] / И.В. Таран, Н.Д. Беликова // Лесн. хоз-во, 1985. № 5. С. 36-38.

Теодоронский, В.С. Объекты ландшафтной архитектуры [Текст]: учеб. пособие для студентов спец. 260500/ В.С. Теодоронский, И.О. Боговая; М.: МГУЛ, 2003. 300 с.

Федорцова, Т.А. Методика эстетической оценки экскурсионных ресурсов (объектов и местностей) [Текст]: Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Минск: БГУ. 1985. 117 с.

Филиппович, Л.С. Картографическое моделирование территориальных рекреационных систем [Текст]: монография / Л.С. Филиппович; М.: Наука, 1983. 140 с.

Фролова, М.Ю. Оценка эстетических достоинств природных ландшафтов [Текст] / М.Ю. Фролова // Вестник МГУ. 1994. сер. 5. География. № 2. С. 27-33.

Царфис, П.Г. Рекреационная география СССР [Текст]: монография / П.Г. Царфис. М.: Мысль, 1979. 237 с.

Человек. Медико-биологические данные [Текст]. М.: Атомиздат, 1977.

Энциклопедический словарь географических терминов [Текст]. Глав. ред. акад. С.В.Калесник. М.: Советская энциклопедия, 1968.

Эрингис, К.И. Сущность и методика детального эколого-эстетического исследования пейзажей [Текст] / К.И. Эрингис, А.Р. Бурдюнас // Экология и эстетика ландшафта / Вильнюс: Минтис, 1975. С. 107-159.

Эстетика [Текст]: учебник. М., 1968. Т. 1. С. 149.

Яценко, И.И. Эстетическая охрана лесов и лесоустройство [Текст] / И.И. Яценко // Гуманитарный экологический журнал. 1999. Т. 1. Вып. 2. С. 72-83.

Учебное издание

**Табаксблат Лазарь Сигизмундович**  
**Аткина Людмила Ивановна**  
**Морозов Андрей Михайлович**

# **ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ**

**Ч. 2**  
**(специальная)**

**Учебное пособие**

Редактор Р.В. Сайгина  
Компьютерная верстка О.А. Казанцева

Подписано в печать 22.06.15	Печать офсетная	Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 6,04	Тираж 100 экз.	Уч.-изд. л. 7,35
		Заказ №

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37  
Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Отпечатано с готового оригинал-макета  
Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ»  
620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2